

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Dennis DVOŘÁK

**ANALÝZA VLIVU KALIBRACE A VYROVNÁNÍ PÁSŮ
NA GEOMETRICKOU PŘESNOST BODOVÉHO MRAČNA
POŘÍZENÉHO UAV LIDAROVÝM SNÍMÁNÍM**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CALIBRATION AND
STRIP ADJUSTMENT ON THE GEOMETRIC ACCURACY OF UAV
LIDAR POINT CLOUDS**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Praha 2021

Vysoká škola: Univerzita Karlova

Fakulta: Přírodovědecká

Katedra: Aplikované geoinformatika a kartografie

Školní rok: 2020/2021

Zadání diplomové práce

Jméno: Dennis Dvořák

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika

Název tématu: Analýza vlivu kalibrace a vyrovnaní pásů na geometrickou přesnost bodového mračka pořízeného UAV lidarovým snímáním

Zásady pro vypracování

Prostorová přesnost bodů získaných z leteckého laserového skenování je nejvíce ovlivněna parametry použitého GNSS přijímače, IMU jednotky a parametry vlastního letu. Důležitou roli hraje přesnost tzv. kalibrace, tj. určení prvků transformace mezi souřadnicovými systémy vlastní skenovací jednotky, IMU a pozicí fázového centra GNSS antény. Diplomová práce se zaměří na ověření přesnosti kalibrace IMU/GNSS jednotky. Porovná geometrickou přesnost bodového mračka dosaženou kalibrací, vyrovnaním skenovaných pásů a jejich kombinací. V experimentální části práce budou využita data pořízená skenerem RIEGL miniVUX-1 UAV ze dvou modelových oblastí – Horní Vidimi a Dlouhé Vsi, která se odlišují jak strukturou krajinného pokryvu, tak použitými parametry letu. Výsledky budou hodnoceny pomocí směrodatných odchylek vzdáleností odpovídajících si ploch naskenovaných v různých pásech v surovém bodovém mračku, případně porovnáním bodových mračen získaných jinou metodou. Další metodou ověření bude porovnání s kontrolními body zaměřenými geodetickými metodami.

Seznam odborné literatury:

CLAUSEN, P., REHAK, M., SKALOUD J. (2016): UAV Sensor Orientation with Pre-calibrated Redundant IMU/GNSS Observations: Preliminary Results. DGPF. Bern, Schweiz: DGPF, 2016. č. 25. ISSN 2512-2819.

CUCCI, D. A., REHAK, M., SKALOUD, J. (2017): Bundle adjustment with raw inertial observations in UAV applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. č. 130, str. 1-12. ISSN 09242716.

GLENNIE, C. (2007): Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. Journal of Applied Geodesy, roč. 1, č. 3, str. 147. GRESSIN, A., MALLET, C., DAVID, N. (2012): Improving 3D LiDAR point cloud registration using optimal neighborhood knowledge. ISPRS. 2012. roč. I-3, str. 111–116.

HABIB, A. F., a kol. (2008): LiDAR strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips. Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008. str. 385-390.

REHAK, M., SKALOUD, J. (2017): Performance assessment of integrated sensor orientation with a low-cost GNSS receiver. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2017. roč. IV-2, č. W3, str. 75-80. ISSN 21949042.

SKALOUD, J., LICHTI, D. (2006): Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2006. roč. 61, č. 1, str. 47-59. ISSN 09242716.

SKALOUD, J., LEGAT, K. (2008): Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2008. roč. 63, č. 2, str. 272-282. ISSN 09242716.

SKALOUD, J., a kol. (2010): Real-time registration of airborne laser data with sub-decimeter accuracy. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, roč. 65, č. 2, str. 208-217.

SKALOUD, J., REHAK, M., LICHTI, D. (2014): Mapping with MAV: Experimental Study on the Contribution of Absolute and Relative Aerial Position Control. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. roč. XL-3, č. W1, str. 123-129. ISSN 16821750.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 16. 01. 2019

Termín odevzdání diplomové práce: 21. 04. 2021

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....

vedoucí diplomové práce

.....

vedoucí katedry

V Praze dne 21. 04. 2021

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně pod vedením Ing. Markéty Potůčkové, Ph.D., a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 21. 04. 2021

.....

Dennis Dvořák

Rád bych tímto poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D., za její odborné vedení, cenné rady a připomínky během zpracovávání celé práce. Moje poděkování patří také kolegům Ing. Davidu Hofmanovi, Ing. Martinu Jáklovi a Štěpánu Bečvářovi, kteří kontrolovali mé výpočty a konzultovali se mnou dosažené výsledky dílčích výzkumů. Katastrálnímu úřadu pro Plzeňský kraj děkuji za poskytnutí dat z oblasti Dlouhá Ves.

CITACE

DVOŘÁK, D. (2021): *Analýza vlivu kalibrace a vyrovnaní pásů na geometrickou přesnost bodového mračna pořízeného UAV lidarovým snímáním*. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. Přírodovědecká fakulta.

DVORAK, D. (2021): *Analysis of the influence of the calibration and strip adjustment on the geometric accuracy of UAV LiDAR point clouds*. Diploma thesis. Charles University in Prague. Faculty of Science.

Abstrakt

Prostorová přesnost bodů získaných z leteckého laserového skenování je nejvíce ovlivněna parametry použitého GNSS přijímače, IMU jednotky a parametry vlastního letu. Důležitou roli hraje přesnost tzv. kalibrace, tj. určení prvků transformace mezi souřadnicovými systémy vlastní skenovací jednotky, IMU a pozicí fázového centra GNSS antény. Diplomová práce se zaměřuje na ověření přesnosti kalibrace IMU/GNSS jednotky. Porovnává geometrickou přesnost bodového mračka dosaženou kalibrací, vyrovnáním skenovaných pásů a jejich kombinací. V experimentální části práce jsou využita data pořízená skenerem RIEGL miniVUX-1UAV ze dvou modelových oblastí – Horní Vidimi a Dlouhé Vsi, která se odlišují jak strukturou krajinného pokryvu, tak použitými parametry letu. Výsledky jsou hodnoceny pomocí směrodatných odchylek vzdáleností odpovídajících si ploch naskenovaných v různých pásích v surovém bodovém mračku, případně porovnáním bodových mraček získaných jinou metodou. Další metodou ověření je porovnání s kontrolními body zaměřenými geodetickými metodami. V rámci hodnocení vlivu metod kalibrací a vyrovnání pásů nebyla zjištěna žádná závislost. Přesnosti těchto metod byly srovnatelné, a to i při porovnání geometrické přesnosti celého bodového mračka. Jediným případem výraznější změny geometrie bodového mračka byl významný posun nebo rotace okraje naskenovaného pásu v případě skenování podélných pásů.

Klíčová slova

UAV, LiDAR, kalibrace, vyrovnání pásů

Abstract

The spatial accuracy of points obtained from aerial laser scanning is most affected by the parameters of the GNSS receiver used, the IMU unit and the parameters of the flight. An important role is played by the accuracy of the calibration. That is the determination of the transformation elements between the coordinate systems of the scanning unit, the IMU and the position of the phase center of the GNSS antenna. The diploma thesis is focused on verifying the accuracy of the IMU/GNSS unit calibration. It compares the geometric accuracy of a point cloud achieved by calibration, alignment of scanned strips and their combinations. The experimental part of the work used data obtained by the RIEGL miniVUX-1 UAV scanner from two model areas – Horní Vidim and Dlouhá Ves, which differ both in the structure of the land cover and the flight used parameters. The results were evaluated by means of standard deviations of the distances corresponding to the areas scanned in different bands in the raw point cloud and by comparing the point clouds obtained by another method. Another method of verification was comparison with check points measured using geodetic methods. No dependence was found in the evaluation of the influence of the methods of calibration and alignment of the strips. The accuracies of these methods were comparable, even when comparing the geometric accuracy of the whole point cloud. The only case of a more significant change in the geometry of the point cloud was shift or rotation of the edge of the scanned strip in the case of cross-flights.

Key words

UAV, LiDAR, calibration, boresight angles, lever-arm offset, strip adjustment

Obsah

Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	15
Seznam grafů.....	17
Seznam použitých zkratk	18
1. Úvod a cíle práce	20
2. Obecný úvod do problematiky.....	23
2.1 Charakteristika UAV.....	23
2.2 LiDAR.....	24
2.2.1 Laserové dálkoměry.....	24
2.2.2 Rozmítání laserového paprsku.....	26
2.2.3 Přesnost skenovacího systému.....	27
2.3 IMU/GNSS.....	29
2.4 Plán letu.....	30
2.5 Zpracování měření UAV	31
2.5.1 Post-processing	31
2.5.2 Přímé georeferencování	32
2.5.3 Úprava dat.....	35
2.6 Kalibrace laserového skenování UAV	36
2.6.1 Kalibrace chyby vektoru rozdílů středů IMU/GNSS jednotky (<i>lever-arm offset</i>)..	37
2.6.2 Kalibrace paralelního usazení středů senzorů (<i>boresight angles</i>)	38
2.6.3 Vliv jednotlivých kalibračních parametrů	39
2.6.4 Výpočet modelu vyrovnání.....	41
2.7 Vyrovnání naskenovaných pásů (<i>strip adjustment</i>)	43
2.8 Parametry hledání společných ploch.....	46
2.9 Ověření přesnosti	48
3. Zájmové území a použítá data	50
3.1 Použitý přístroj	50
3.2 Oblast Horní Vidim.....	51
3.2.1 Charakteristika zájmového území.....	51
3.2.2 Použitá data UAV	52
3.2.3 Použitá data pro validaci.....	54

3.3	Oblast Dlouhá Ves	55
3.3.1	Charakteristika zájmového území.....	55
3.3.2	Použitá data UAV	55
3.3.3	Použitá data pro validaci.....	57
4.	Metodika	59
4.1	Výběr metodiky.....	59
4.2	Zpracování dat.....	62
4.2.1	Předzpracování – georeferencování trajektorie UAV.....	62
4.2.2	Zpracování dat UAV.....	63
4.2.3	Zpracování dat pro validaci	64
5.	Výsledky.....	66
5.1	Oblast Horní Vidim.....	66
5.1.1	Parametry hledání společných ploch slícování.....	66
5.1.2	Kalibrace LA a BA	68
5.1.3	Kalibrace LA.....	70
5.1.4	Kalibrace BA	73
5.1.5	Celkové vyrovnání pásů.....	75
5.1.6	Vyrovnání pásů - posun	77
5.1.7	Vyrovnání pásů - rotace.....	80
5.1.8	Kalibrace LA a BA a vyrovnání pásů.....	82
5.1.9	Rezidua na kontrolních bodech.....	85
5.2	Oblast Dlouhá Ves	87
5.2.1	Parametry hledání společných ploch slícování.....	87
5.2.2	Kalibrace LA a BA	88
5.2.3	Kalibrace LA.....	89
5.2.4	Kalibrace BA	91
5.2.5	Celkové vyrovnání pásů.....	92
5.2.6	Vyrovnání pásů – posun	94
5.2.7	Vyrovnání pásů - rotace.....	96
5.2.8	Kalibrace LA a BA a vyrovnání pásů.....	97
5.2.9	Rezidua na kontrolních bodech.....	99
6.	Diskuze.....	101
7.	Závěr	105
	Použitá literatura a zdroje práce.....	106
	Přílohy práce	112

Použitý software	121
Použité přístroje	122

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Schéma umístění měřicích přístrojů: laserový skener (CAM), IMU jednotka a DGPS (ANT) (Rehak a kol. 2015, s. 26)	23
Obrázek 2.2: Klíčové součásti laserového skeneru UAV (přeloženo: Wehr a kol. 1999)	24
Obrázek 2.3: Vlevo – schéma pulsního dálkoměru (Jašek 2018 cit. Rueger 1990); vpravo nahoře – AT je vyslaný signál; vpravo dole – AR je dopočetní času mezi impulzy (Wehl a kol. 1999)	25
Obrázek 2.4: Vlevo – schéma fázového dálkoměru (Jašek 2018 cit. Rueger 1990); vpravo nahoře – AT je vyslaný signál; vpravo dole – AR je dopočetní fáze vlny ($\Phi R - \Phi T$) (Wehl a kol. 1999)	26
Obrázek 2.5: Skenovací mechanismy (Wehl a kol. 1999)	26
Obrázek 2.6: Prostorová polární metoda (Jašek 2018; s. 16)	27
Obrázek 2.7: Plán letu a případné umístění vlíčovacích a kontrolních bodů (vlevo přeloženo: Cucci a kol. 2017, s. 8; vpravo nahoře Moudry a kol. 2019; vpravo dole Li a kol. 2019)	30
Obrázek 2.8: Vlícovací bod – vlevo – použití terče měření Nechranická přehrada; vpravo – koule pro účely skenování – lokalita Horní Vidim	31
Obrázek 2.9: Proces zpracování leteckých laserových dat (přeloženo: Wehl a kol. 1999, s. 79)	32
Obrázek 2.10: Kalibrace systematických posunů a rotací pomocí přímého georeferencování (Li a kol. 2019)	33
Obrázek 2.11: Chyba měření laserového skeneru UAV (Li a kol. 2019)	36
Obrázek 2.12: Poloha jednotlivých senzorů (přeloženo: Li a kol. 2017)	38
Obrázek 2.13: Použité metody pro kalibraci BA –Vlevo: Přelety různými směry (trajektorie UAV) (přeloženo: Cucci a kol. 2017, s. 8); Vpravo: Porovnání vhodnosti využití stadionu a zastavěné plochy pro potřeby kalibrace (Skaloud a kol. 2006, s. 52)	39
Obrázek 2.14: Vlevo – souřadnicové osy IMU a LiDARu, Vpravo - posuny x, y, z a rotace ω, ϕ, κ v centru snímače (Vlevo upravený Li a kol. 2019; vpravo Tu a kol. 2018)	40
Obrázek 2.15: Strip adjustment – naskenované plochy, žlutě jsou označeny kontrolní body (upravený a přeložený Habib a kol. 2008)	44
Obrázek 2.16: Překrytí pásů a omezení úhlu naskenovaného bodového mračna (upravený Chen a kol. 2021)	45
Obrázek 2.17: Strip adjustment – vyrovnání datové referenční plochy (upravený a přeložený Bretar a kol. 2004)	45
Obrázek 2.18: Strip adjustment – hledání ploch slícování (Rieger a kol. 2008)	46
Obrázek 2.19: Příčný řez – před kalibrací a po kalibraci senzoru – praktický přístup (vlevo: Wang a kol. 2010; vpravo: Habib a kol. 2008; dole: Li a kol. 2019)	48

Obrázek 2.20: Nahoře: Výšková rezidua dvou vybraných naskenovaných mračen (Urban a kol. 2018, s. 334); dole: Příčný profil a rozdíly tří naskenovaných mračen (Koska a kol. 2017)	49
Obrázek 3.1: Skener RIEGL miniVUX-1UAV (Upraveno – RIEGL 2020)	50
Obrázek 3.2: Experimentální oblast Horní Vidim – ortofoto (zdroj: Mapy.cz)	51
Obrázek 3.3: Trajektorie a názvy naskenovaných pásů Horní Vidim. Výrazně označeny použité pásy. (zdroj: CloudCompare)	52
Obrázek 3.4: Originální naskenované pásy Horní Vidim – barevné označení použitých pásů (modrá – 191015_123131; šedá – 191015_123815; oranžová – 191015_123938)	53
Obrázek 3.5: Foto experimentální oblasti Horní Vidim. Vlčovací body. nahoře – zaměřený patník; vlevo dole – terč; vpravo dole – koule; vpravo – rozmístění bodů	54
Obrázek 3.6: Experimentální oblast Dlouhá Ves – ortofoto (zdroj: Mapy.cz)	55
Obrázek 3.7: Trajektorie UAV – Dlouhá Ves. (zdroj: RiProcess)	56
Obrázek 3.8: Originální naskenované pásy Dlouhá Ves – barevné označení použitých pásů (zdroj: RiProcess)	56
Obrázek 3.9: Dlouhá Ves – rozmístění kontrolních bodů	57
Obrázek 4.1: Proces zpracování dat z UAV (upraveno Harder a kol. 2019)	62
Obrázek 4.2: Horní Vidim - údaje trajektorie UAV – x, y, z, ϕ , ω , κ , geodetické datum (zdroj: CloudCompare)	62
Obrázek 4.3: Bodové mračno Horní Vidim - vlevo – 3D pohled na vybrané naskenované pásy; vpravo – 2D pohled (vybrané pásy – červená, modrá, zelená) (zdroj: upraveno RiProcess)	63
Obrázek 4.4: Bodové mračno Horní Vidim - úhlové omezení pásů a jejich vzájemná poloha – vybrané tři pásy (zdroj: CloudCompare)	63
Obrázek 4.5: Kalibrace a vyrovnání pásů – nahoře oblast Dlouhá Ves, dole oblast Horní Vidim (zdroj: upraveno RiPROCESS)	64
Obrázek 4.6: Horní Vidim - zobrazení kontrolních bodů v bodovém mračnu (zdroj: CloudCompare)	65
Obrázek 5.1: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA a BA - kombinace 1 (O1)	69
Obrázek 5.2: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA a BA - kombinace 2 (O1)	70
Obrázek 5.3: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA - kombinace 1 (O1)	72
Obrázek 5.4: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA - kombinace 2 (O1)	72
Obrázek 5.5: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace BA - kombinace 1 (O1)	74
Obrázek 5.6: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace BA - kombinace 2 (O1)	74

Obrázek 5.7: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů - kombinace 1 (O1).....	76
Obrázek 5.8: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů - kombinace 2 (O1).....	77
Obrázek 5.9: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů - posun - kombinace 1 (O1)	79
Obrázek 5.10: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů - posun - kombinace 2 (O1)	79
Obrázek 5.11: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů - rotace - kombinace 1 (O1)	81
Obrázek 5.12: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů - rotace - kombinace 2 (O1)	82
Obrázek 5.13: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA a BA a SA - kombinace 1 (O1)	84
Obrázek 5.14: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA a BA a SA - kombinace 2 (O1)	85
Obrázek 5.15: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA a BA (O2)	89
Obrázek 5.16: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA (O2).....	90
Obrázek 5.17: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace BA (O2).....	91
Obrázek 5.18: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů (O2)	93
Obrázek 5.19: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů - posun (O2) ...	95
Obrázek 5.20: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnaní pásů - rotace (O2) ...	97
Obrázek 5.21: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA a BA a SA (O2)..	99
Obrázek 5.22: Řez dvou naskenovaných pásů (_111926 – zelená; _111718 - červená) nekalibrovaným bodovým mračnem	100
Obrázek 5.23: Řez dvou naskenovaných pásů (_111926 – zelená; _111718 – červená) po provedení kalibrace LA a BA a metody SA	100

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Technické parametry skeneru RIEGL miniVUX-1UAV (Upraveno – RIEGL 2020)	50
Tabulka 3.2: Souřadnice kontrolních bodů – Horní Vidim	54
Tabulka 3.3: Souřadnice kontrolních bodů – Dlouhá Ves	58
Tabulka 5.1: Parametry hledání ploch slícování (O1)	67
Tabulka 5.2: Použité parametry hledání ploch slícování (O1)	68
Tabulka 5.3: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA (O1)	68
Tabulka 5.4: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA (O1)	68
Tabulka 5.5: Výsledky výpočtu – kalibrace LA (O1)	70
Tabulka 5.6: Hodnoty LA kalibrací – kalibrace LA (O1)	71
Tabulka 5.7: Výsledky výpočtu – kalibrace BA (O1)	73
Tabulka 5.8: Hodnoty BA kalibrací – kalibrace BA (O1)	73
Tabulka 5.9: Výsledky výpočtu – vyrovnaní pásů (O1)	75
Tabulka 5.10: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů - kombinace 1 (O1)	75
Tabulka 5.11: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů - kombinace 2 (O1)	76
Tabulka 5.12: Výsledky výpočtu – vyrovnaní pásů - posun (O1)	77
Tabulka 5.13: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů - posun – kombinace 1 (O1)	78
Tabulka 5.14: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů - posun – kombinace 2 (O1)	78
Tabulka 5.15: Výsledky výpočtu – vyrovnaní pásů - posun (O1)	80
Tabulka 5.16: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů - rotace - kombinace 1 (O1)	80
Tabulka 5.17: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů - rotace – kombinace 2 (O1)	80
Tabulka 5.18: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA a SA – kombinace 1 (O1)	82
Tabulka 5.19: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 1 (O1) ..	82
Tabulka 5.20: Hodnoty SA – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 1 (O1)	83
Tabulka 5.21: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA a SA – kombinace 2 (O1)	83
Tabulka 5.22: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 2 (O1) ..	83
Tabulka 5.23: Hodnoty SA – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 2 (O1)	83
Tabulka 5.24: Rezidua na kontrolních bodech v mm – software Infinity – kombinace 1 (O1)	86
Tabulka 5.25: Rezidua na kontrolních bodech v mm – software Infinity - kombinace 2 (O1)	86
Tabulka 5.26: Parametry hledání ploch slícování (O2)	87
Tabulka 5.27: Použité parametry hledání ploch slícování (O2)	88

Tabulka 5.28: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA (O2)	88
Tabulka 5.29: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA (O2).....	88
Tabulka 5.30: Výsledky výpočtu – kalibrace LA (O2)	89
Tabulka 5.31: Hodnoty LA kalibrací – kalibrace LA (O2)	89
Tabulka 5.32: Výsledky výpočtu – kalibrace BA (O2)	91
Tabulka 5.33: Hodnoty BA kalibrací – kalibrace BA (O2).....	91
Tabulka 5.34: Výsledky výpočtu – vyrovnaní pásů (O2).....	92
Tabulka 5.35: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů (O2)	92
Tabulka 5.36: Výsledky výpočtu – vyrovnaní pásů – posun (O2)	94
Tabulka 5.37: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů - posun (O2)	94
Tabulka 5.38: Výsledky výpočtu – vyrovnaní pásů - rotace (O2).....	96
Tabulka 5.39: Hodnoty SA – vyrovnaní pásů - rotace (O2).....	96
Tabulka 5.40: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA a SA (O2)	97
Tabulka 5.41: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA a SA (O2).....	97
Tabulka 5.42: Hodnoty SA – kalibrace LA a BA a SA (O2)	98
Tabulka 5.43: Rezidua na kontrolních bodech v mm – software Infinity (O2).....	99

Seznam grafů

Graf 5.1: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA a BA - kombinace 1 (O1).....	69
Graf 5.2: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA a BA - kombinace 2 (O1).....	69
Graf 5.3: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA - kombinace 1 (O1).....	71
Graf 5.4: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA - kombinace 2 (O1).....	71
Graf 5.5: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace BA - kombinace 1 (O1).....	73
Graf 5.6: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace BA - kombinace 2 (O1).....	73
Graf 5.7: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů - kombinace 1 (O1)	75
Graf 5.8: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů - kombinace 2 (O1)	76
Graf 5.9: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů - posun - kombinace 1 (O1).....	78
Graf 5.10: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů - posun - kombinace 2 (O1).....	78
Graf 5.11: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů - rotace - kombinace 1 (O1).....	80
Graf 5.12: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů - rotace - kombinace 2 (O1).....	81
Graf 5.13: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci a SA – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 1 (O1)	83
Graf 5.14: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci a SA – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 2 (O1)	84
Graf 5.15: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA a BA (O2)	88
Graf 5.16: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA (O2).....	90
Graf 5.17: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace BA (O2)	91
Graf 5.18: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů (O2)	92
Graf 5.19: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů - posun (O2)	94
Graf 5.20: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnaní pásů - rotace (O2)	96
Graf 5.21: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci a SA – kalibrace LA a BA a SA (O2).....	98

Seznam použitých zkratk

ALS	<i>(Airborne Laser Scanning)</i> letecké laserové skenování
BA	<i>(Boresight Angles)</i> paralelní usazení středů snímačů IMU/GNSS a LiDARu
BDS	<i>(BeiDou System)</i> čínský globální družicový polohový systém
CAD	<i>(Computed-Aided Design/Drafting)</i> počítačem podporované projektování/kreslení
CCD	<i>(Charge-Coupled Device)</i> zařízení s vázanými náboji (součást dálkoměrů)
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DGPS	<i>(Differential Global Positioning System)</i> diferenciální globální polohový systém
DMT	Digitální model terénu
ETRS89	<i>(European Terrestrial Reference System 1989)</i> evropský terestrický polohový systém
GIS	Geografické informační systémy
GLONASS	<i>(GLObalnaja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistéma)</i> ruský globální družicový polohový systém
GNSS	<i>(Global Navigation Satellite System)</i> globální družicový polohový systém
GPS	<i>(Global Positioning System)</i> americký globální družicový polohový systém
IMU	<i>(Inertial Measurement Unit)</i> inerciální měřicí jednotka
KF	Kalmanův filtr
LA	<i>(Level-Arm offset)</i> vektor rozdílu středů snímačů IMU/GNSS a LiDARu
LiDAR	<i>(Light Detenction And Ranging)</i> detekce objektů a vzdáleností světlem
MAV	<i>(Micro Aerial Vehicle)</i> malé bezpilotní letadlo (<i>syn. RPAS, UAS, UAV</i>)

MNČ	metoda nejmenších čtverců
POS	<i>(Position and Orientation System)</i> systém pro pozici a orientaci
RC	<i>(Radio Control)</i> rádiové ovládání
RPAS	<i>(Remotely Piloted Aircraft Systems)</i> dálkově pilotované letadlové systémy (syn. MAV, UAS, UAV)
RTK	<i>(Real-Time Kinematic)</i> kinematický v reálném čase
SA	<i>(Strip Adjustment)</i> vyrovnání pásů
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
TIN	<i>(Triangulated Irregular Network)</i> nepravidelná trojúhelníková síť
UAS	<i>(Unmanned Aircraft Systems)</i> bezpilotní letadlo (syn. MAV, RPAS, UAV)
UAV	<i>(Unmanned Aerial Vehicle)</i> bezpilotní letadlo (syn. MAV, RPAS, UAS)
WGS84	<i>(World Geodetic System 1984)</i> geodetický polohový referenční systém

1. Úvod a cíle práce

V posledních letech došlo k významnému vývoji laserového skenování. Laserové skenování je technologie, která umožňuje získat prostorová data z daného území v podobě množiny diskrétních bodů, tzv. bodového mračka. Jeho předností je rychlost sběru dat a jeho velká využitelnost napříč obory. Jeho aplikace najdeme ve 3D modelování stavebních objektů, v dokumentaci provedení skutečných stavů, například staveb, v zaměřovacích pracích pro archeology, pro potřeby využití GIS, přírodovědné obory, geotechnický monitoring, pro potřebu těžebního průmyslu nebo pro potřebu digitalizace katastru nemovitostí. Laserové skenování můžeme rozdělit do několika druhů: pozemní (terestrické či statické), letecké, mobilní a ruční. S příchodem kvadrokoptér, dronů a RC modelů je v současnosti letecké laserové skenování jednou z nejprogresivnější se rozvíjejících metod sběru dat. Nejvíce se o to zasloužil rozvoj a především finanční dostupnost bezpilotních prostředků (UAV), kterými je laserový skener nesen, společně s rozvojem technologií a metod zpracování dat globálních navigačních družicových systémů (GNSS) a inerciálních navigačních/měřicích systémů/jednotek (INS/IMU).

Při jakémkoli měření, a to nejen při laserovém skenování, je důležitá otázka výsledné přesnosti měření. Podle přesnosti měření je možné určit, k jakému typu úloh je metoda měření použitelná. Pro určení výpočtu prostorové přesnosti bodů určených UAV laserovým skenováním je potřeba uvést základní přístrojové vybavení. To sestává z laserového skeneru (LiDAR), GNSS jednotky a jednotky IMU. Z vlastností těchto přístrojů lze určit dílčí chyby měření, jež následně určí výslednou prostorovou přesnost bodu. Mezi tyto dílčí chyby patří chyba LiDARu, chyba polohy GNSS aparatury a chyba IMU jednotky. Při výpočtu systematických chyb měření je nutné zohlednit také centrum laserového snímače, snímačů IMU a GNSS. Středů senzorů IMU a GNSS jsou neměnné a není potřeba provádět jejich redukci (IMU jednotka synchronizuje měření veličin gyroskopu a akcelerometru s etapovým měřením GNSS aparatury, výsledná nepřesnost synchronizace je velmi malá, jedná se spíše o technologický problém). Problém výsledné přesnosti naskenovaného bodového mračka nastává při výpočtu vektoru rozdílů středů IMU/GNSS jednotky, která je charakterizována jako jeden senzor a LiDARu, respektive jejich paralelních usazení.

Kalibrace (tj. zjištění určité systematické chyby) vektoru rozdílů středů (orig. *level-arm offset* - *LA*) a paralelního usazení (orig. *boresight angles* - *BA*) snímačů IMU/GNSS a LiDARu platformy UAV má zásadní vliv na přesnost výsledného bodového mračka. Rehak (2017) zmiňuje, že právě chyba vektoru rozdílů středů a paralelního usazení těchto snímačů má největší vliv na výslednou přesnost. Pokud tato kalibrace není provedena, dochází k systematickým posunům a rotacím jednotlivých bodů v bodovém mračnu v průběhu celého letu a neprovedení této kalibrace následně velmi ovlivňuje geometrickou přesnost naskenovaného mračka. Zároveň autoři, jako například Habib (2008), Wang (2010) nebo Rehak (2015), kteří se problematikou kalibrace senzorů UAV zabývají, se shodují na tom, že prozatím neexistuje žádný standardní postup této kalibrace. Každá firma či instituce má vlastní postup. Přesto kalibrace vektoru rozdílů a paralelního usazení snímačů probíhá ve většině případů pomocí výpočtu vyrovnáním dle metody nejmenších čtverců (MNČ) a většina softwarových řešení post-processingu UAV laserového skenování používá právě tuto metodu výpočtu. Při výpočtu této metody se zpracovává přímá georeference do určitého souřadnicového systému. Následně se vyberou pomocí zadaných kritérií body nebo plochy, které se pomocí výpočtu MNČ slícují, přičemž parametry kalibrace vstupují do výpočtu jako neznámé. O opravené hodnoty kalibrací se následně přepočítává centrum senzoru promítání LiDARu, respektive IMU jednotky.

Ačkoli se kalibrací a provedením justáže chyby vektoru rozdílů středů a paralelního usazení snímačů IMU/GNSS a LiDARu zvýší přesnost bodového mračka, autoři jako Li (2017) nebo Habib (2008) se snaží najít metodu, jež zajistí nehledě na kalibraci vyrovnání naskenovaných geometrických primitiv bodového mračka. Jednou z metod, kterou využívají, je vyrovnání naskenovaných pásů (orig. *strip adjustment* - *SA*), přičemž sousední naskenované pásy vyrovnávají na předem definované společné plochy. Podle Habiba (2008) nebo také Wang (2010) tato metoda geometricky zpřesní výsledné bodové mračno a navíc není potřeba využívat složitý postup při původní kalibraci. Na tomto místě se zmiňují především o matematické složitosti přímého georeferencování při výpočtu kalibrací. Proto je možné při SA vyrovnat pásy a následně až poté pomocí vlíčovacích bodů georeferencovat bodové mračno. Habib (2008) navíc uvádí, že pokud by metoda kalibrací vektoru rozdílů středů a paralelního usazení snímačů IMU/GNSS byla bezchybná a odstranila by veškeré systematické chyby těchto senzorů, posun a rotace pásů by byla nulová.

Hlavním cílem této práce je optimalizace postupu zpřesnění prostorové polohy dílčích bodů bodového mračka naskenovaného v překrývajících se pásích, a to zpřesněním výrobcem

daných kalibračních parametrů (LA, BA), vyrovnaním pásů (SA), popř. jejich kombinace. V analytické části je statistické hodnocení, jakým způsobem kalibrace nebo SA přesnost zvyšují, případně nemění. Je zkoumán vliv posunu a rotace jednotlivých naskenovaných pásů na celkovou přesnost. Dílčím cílem pak je posouzení vlivu orientace skenovaných pásů (příčné a podélné pásy – označení Stocker (2017), s. 355). Současně je v práci dotčena problematika hledání parametrů společných ploch slícování.

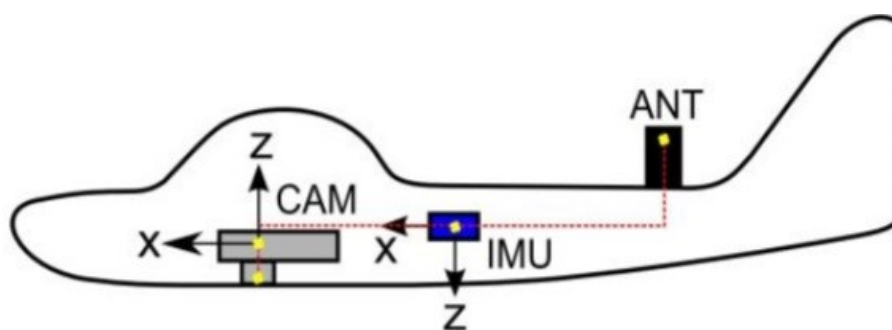
Jelikož se jedná spíše o technický problém, v počátek úvodu do problematiky je věnován především komponentám UAV systému pro laserové skenování. Je zde uvedena obecná terminologie týkající se laserového skenování, popis měření UAV a samotný teoretický základ pro výpočet vektoru rozdílů středů a úhlů paralelního usazení snímačů IMU/GNSS a LiDARu a také popis metodiky zpřesňování bodového mračna. Práce vychází z literární rešerše, která se kalibrací zabývá.

Pro výzkum byl použit laserový skener RIEGL miniVUX-1UAV a IMU/GNSS typu Applanix APX-15 UAV. Jako modelové území byly vybrány dvě lokality. První lokalitou byl okraj obce Horní Vidim v okrese Mělník a jako druhá lokalita bylo vybráno území středu obce Dlouhá Ves v okrese Klatovy. Zatímco skenování první lokality se soustředí spíše na extravilán, druhá oblast se zaměřuje na intravilán obce. Součástí práce je ověření výsledku slícování dat pomocí kontrolních bodů zaměřených GNSS metodou (RTK) a pomocí vhodně zvolených příčných řezů přes různé objekty. V metodické části je popsán postup a vlastní zpracování jednotlivých metod měření. V dalších kapitolách jsou uvedeny výsledky výpočtů a jejich statistická analýzy. Následně jsou výsledky zhodnoceny a je provedena diskuze.

2. Obecný úvod do problematiky

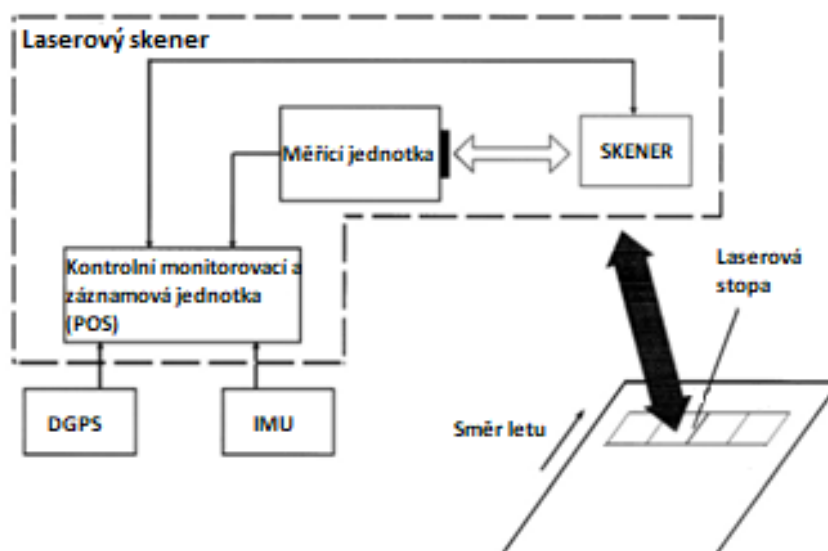
2.1 Charakteristika UAV

Laserové skenery využívají opticko-mechanické skenovací sestavy. Pracují na principu zjištění vzdálenosti mezi senzorem a místem, kam dopadne vyslaný paprsek. K těmto skenerům můžeme zařadit skenery nesené pilotovaným letadlem a skenery připojené na UAV platformu (Wehr a kol. 1999, s. 68; Baltsavias 1999b). Všechny tyto letecké platformy laserových skenerů obsahují tyto klíčové součásti: laserovou měřicí jednotku, opticko-mechanický skener a řídicí jednotku (obr. 2.1) (Wehr a kol. 1999; Hyyppä a kol. 2020).



Obrázek 2.1: Schéma umístění měřicích přístrojů: laserový skener (CAM), IMU jednotka a DGPS (ANT) (Rehak a kol. 2015, s. 26)

Základem uvedeného mechanismu je kontrolní monitorovací a záznamová jednotka (POS). Tato jednotka zpracovává údaje ze tří přístrojů; jedná se o měřicí jednotku (laserový skener), DGPS (diferenciální GNSS) a IMU jednotku (obr. 2.2) (Rehak a kol. 2015; Li a kol. 2017). Spojení komunikace jednotky DGPS a jednotky IMU pomocí POS se v odborné literatuře (Skaloud a kol. 2008; Rehak a kol. 2015 nebo Clausen a kol. 2016) označuje jako IMU/GNSS. Klíčové součásti UAV jsou tedy senzory LiDAR a IMU/GNSS (Li a kol. 2019). Princip fungování POS jednotky uvádí například ve svém článku Li (2017).



Obrázek 2.2: Klíčové součásti laserového skeneru UAV (přeloženo: Wehr a kol. 1999)

Základní dělení UAV přístrojů je (Jašek 2018):

- bezpilotní letouny,
- bezpilotní vrtulníky,
- multikoptéry,
- vzducholodě,
- ostatní.

2.2 LiDAR

2.2.1 Laserové dálkoměry

Přístroj využívající laser pro měření vzdálenosti se označuje jako LiDAR. Tyto, ve své podstatě dálkoměry, jsou založeny na principu elektronického určení délky. Využívají vyslání elektromagnetického vlnění a odrazení paprsku do zdrojového centra. Používají se nejčastěji dva principy měření a určování délek: pulsní určování délky a fázové určování délky (Rueger 1990; Wehr a kol. 1999).

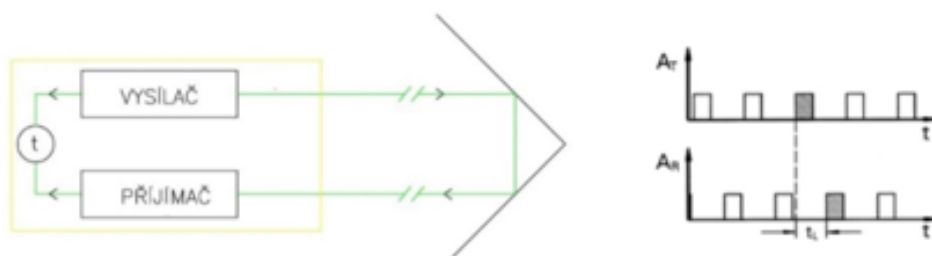
V současné době je nejpoužívanějším způsobem ve skenovacích systémech pulsní určování délky. Princip pulsního určování délky je založen na měření tranzitního času (obr. 2.3). Vysílač LiDARu vyšle impuls a v té chvíli začne výpočet tranzitního času, který trvá až do zpětného přijetí paprsku. Problém nastává při vypočítání tranzitního času. Pokud

je přesnost odečtu času 0,1 ns, je přesnost určení délky 15 mm. Tranzitní čas vypočítávají metody časoměrné základny nebo metody časoměrných impulsů. Výhodou tohoto určování délky je velký dosah dálkoměru (Baltsavias 1999b; Wehr a kol. 1999; Jašek 2018 cit. Rueger 1990). Základní rovnice pro výpočet pulsního určení délky je (Wehr a kol. 1999 a Jašek 2018 cit. Rueger 1990):

$$R = \frac{1}{2} c (t_R - t_T) \quad (2.1),$$

kde:

- R je měřená vzdálenost;
- c je rychlost světla v prostředí měření;
- t_R je čas přijetí impulsu;
- t_T je čas vyslání impulsu.



Obrázek 2.3: Vlevo – schéma pulsního dálkoměru (Jašek 2018 cit. Rueger 1990); vpravo nahoře – A_T je vyslaný signál; vpravo dole – A_R je dopočtení času mezi impulzy (Wehl a kol. 1999)

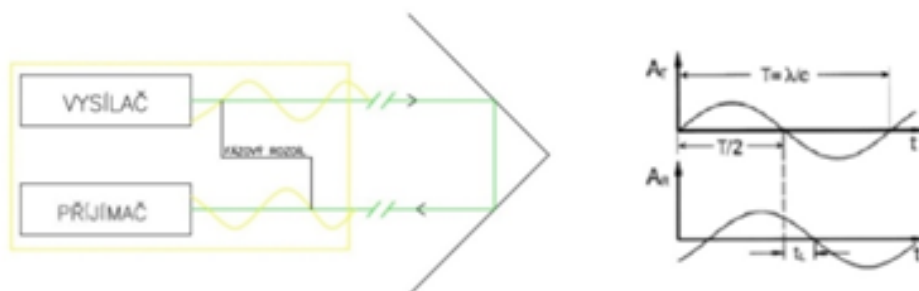
Fázový dálkoměr měří fázový rozdíl u vyslaného signálu (obr. 2.4). Přístroj vyšle fázovou vlnu a zpět se vrátí vlna v jiné fázi. Jelikož jsou známy parametry modulované vlny, přístroj z tohoto rozdílu dopočte měřenou vzdálenost. Přístroje používají více různých délek vyslaných vln, aby byla přesnost fázového doměrku co největší. Stejně jako u pulsního určování délek je rychlost paprsku dána indexem lomu prostředí. Tento index nejvíce ovlivňuje teplota, tlak a vlhkost. Ve většině moderních přístrojů s dálkoměrem si může uživatel tyto hodnoty nastavit. Fázové určení délek využívají přístroje, které slouží k velmi přesné práci. Nevýhodou fázového dálkoměru je, že jím nelze měřit krátké vzdálenosti (Baltsavias 1999b; Wehl a kol. 1999; Jašek 2018).

Základní rovnice pro výpočet fázového určení délky je (Wehr a kol. 1999):

$$R = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \Phi \quad (2.2),$$

kde:

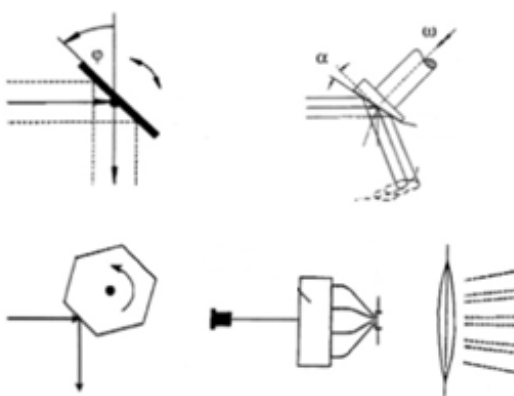
- R je měřená vzdálenost;
- c je rychlost světla v prostředí měření;
- f je vlnová délka;
- Φ je měřená fáze vlny (fázový rozdíl v radiánech).



Obrázek 2.4: Vlevo – schéma fázového dálkoměru (Jašek 2018 cit. Rueger 1990); vpravo nahoře – A_T je vyslaný signál; vpravo dole – A_R je dopočetí fáze vlny ($\Phi_R - \Phi_T$) (Wehl a kol. 1999)

2.2.2 Rozmítání laserového paprsku

Pro laserový skener je charakteristické, že dokáže změřit několik tisíc bodů za minutu. Konstrukčně je toto řešeno zařízením k rozmítání svazku. Výrobci laserových skenerů používají několik konstrukčních možností (obr. 2.5) (Wehl a kol. 1999).



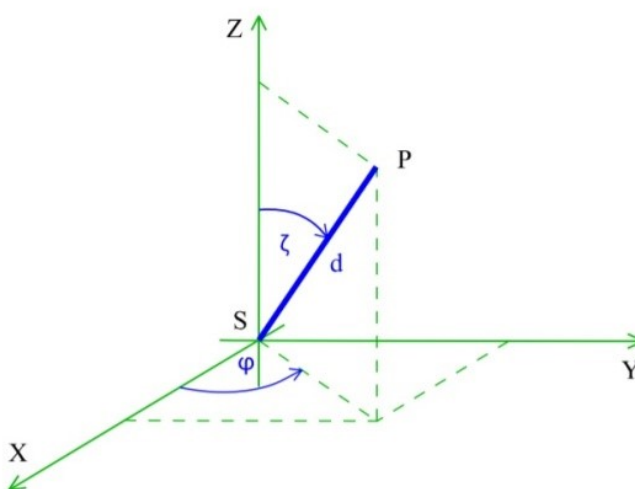
Obrázek 2.5: Skenovací mechanismy (Wehl a kol. 1999)

Nejjednodušším řešením rozmítání svazku paprsku je rozmítání pomocí zrcadla. Takto vznikne svazek laseru v jedné rovině. Pokud by bylo použito více zrcadel, nastalo by vychýlení ve více směrech. Další možností je rozmítání prostřednictvím optického elementu, který má tvar n -úhelníku. Tento optický element odráží paprsky pomocí své rotace

(Wehl a kol. 1999; Štroner a kol. 2008). Rozmítání svazku paprsků lze dosáhnout také rotací zdroje záření. Používá se k tomu systém motorů, které jsou umístěny vertikálně a horizontálně. Tímto se svazek paprsků vychyluje ve dvou osách (Štroner a kol. 2008; Jašek 2018). Pomocí CCD senzoru lze rozmítat svazek ve výseči světelné roviny (Štroner a kol. 2008; Jašek 2018). Jednou z dalších metod rozmítání v laserových skenerech je metoda optických vláken. Laserový paprsek je promítán do optických vláken, která jsou uspořádána do kružnice. Následně se optické dráty rovnají do roviny. Motor přitom stále rotuje optickými vlákny, čímž vznikají oscilující rozptýlené svazky (Wehl a kol. 1999; Štroner a kol. 2008).

2.2.3 Přesnost skenovacího systému

Nedílnou součástí rozboru skenovacího systému je určení přesnosti laserového skeneru. Vlivů na přesnost změřeného bodového mračka může být vícero. Tyto vlivy například Štroner (2008), Eker (2017), i Jašek (2018) dělí na vnitřní a vnější. Mezi hlavní vnitřní vlivy patří přesnost určení vodorovného a zenitového úhlu. K dalším parametrům, které zasahují do výsledné přesnosti, patří tzv. vlivy systematické, jež nelze odstranit, jelikož jsou součástí každého přístroje. Lze je eliminovat například vhodnou kalibrací (Pirasteh a kol. 2016). Vlivy chyb měření úhlů a délek však můžeme vyjádřit chybovým modelem, respektive rozбором určení polohy bodů (Jašek 2018). Novák (1998) nebo Jašek (2018) odvozují rovnici polohové přesnosti měřeného bodu z prostorové polární metody (obr. 2.6).



Obrázek 2.6: Prostorová polární metoda (Jašek 2018; s. 16)

Rovnice výpočtu souřadnic (dle Jaška 2018; kontrola výpočtu Novák a kol. 1998):

$$x = d \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\zeta)$$

$$y = d \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\zeta)$$

$$z = d \cdot \sin(\zeta) \quad (2.3),$$

kde: d je měřená délka;
 ω je měřený vodorovný úhel;
 ζ je měřený zenitový úhel.

Odvození dále pokračuje vztahem skutečných chyb, které definují souřadnicovou soustavu danou laserovým skenerem. Poté jsou podle zákona hromadění směrodatných odchylek vypočteny odchylky souřadnic určovaného bodu (viz výpočty Jašek 2018, s. 25–26). Výsledná rovnice zní:

$$\sigma_P = \sqrt{\sigma_d^2 + d^2 \cdot \sin^2 \zeta \cdot \sigma_\omega^2 + d^2 \cdot \sigma_\zeta^2} \quad (2.4),$$

kde: σ_P je směrodatná odchylka měřeného bodu;
 σ_d je směrodatná odchylka měřené délky;
 σ_ω je směrodatná odchylka vodorovného úhlu;
 σ_ζ je směrodatná odchylka zenitového úhlu.

Tato rovnice odpovídá přesnosti měření terestrického laserového skeneru. Přesto pro velmi přesné práce a s ohledem k veškerým vlivům měření UAV by bylo vhodné tento parametr zohlednit (Gressin a kol. 2012; Li a kol. 2019).

Jak je uvedeno výše, dalšími parametry, které ovlivňují průběh paprsku laserového skeneru, jsou vnější vlivy. Výrazným vlivem je prostředí, kterým prochází svazek. Důvodem jsou změny indexu lomu, kterým prochází elektromagnetické záření. Paprsky poté nejsou přímkami, ale prostorovými křivkami (Wehl a kol. 1999; Baltsavias 1999b). Mezi další vnější vlivy patří například vliv geometrie skenovaných objektů (Jašek 2018).

2.3 IMU/GNSS

Základním předpokladem pro správnou součinnost LiDARu, IMU a GNSS antény leteckého laserového skenování je správná funkce kontrolní, monitorovací a záznamové jednotky (POS). Zatímco laserový skener měří vzdálenost a úhly, je potřeba kvůli pohybu UAV znát 3D polohu skeneru a následně vypočítat 3D polohu bodů na zemském povrchu (Wahl a kol. 1999; Cucci a kol. 2017).

GNSS senzor slouží k lokalizaci přístroje. Systém primárně pracuje v globálním souřadnicovém systému (WGS84). GNSS může využívat v současné době čtyři systémy: GPS, GLONASS, BeiDou a Galileo. Skládá se z kosmického segmentu (družice), řídicího segmentu (monitoring družic a zpracování pomocných dat) a uživatelského segmentu (přijímač GNSS). UAV využívá speciální oddělenou anténu pro GNSS měření. Anténa je kruhově polarizována a musí být schopna přijmout signál ze všech směrů hemisféry. GNSS pracují na principu dálkoměrných systémů. Pro výpočet polohy je třeba znát vzdálenost přijímače od družice (protínání z délek). Pro zpřesnění se používá metoda RTK nebo následné zpracování (postprocessing). V České republice provozuje síť stanic pro korekce GNSS (tzv. CZEPOS) ČÚZK (Štroner a kol. 2013; Trafina 2018).

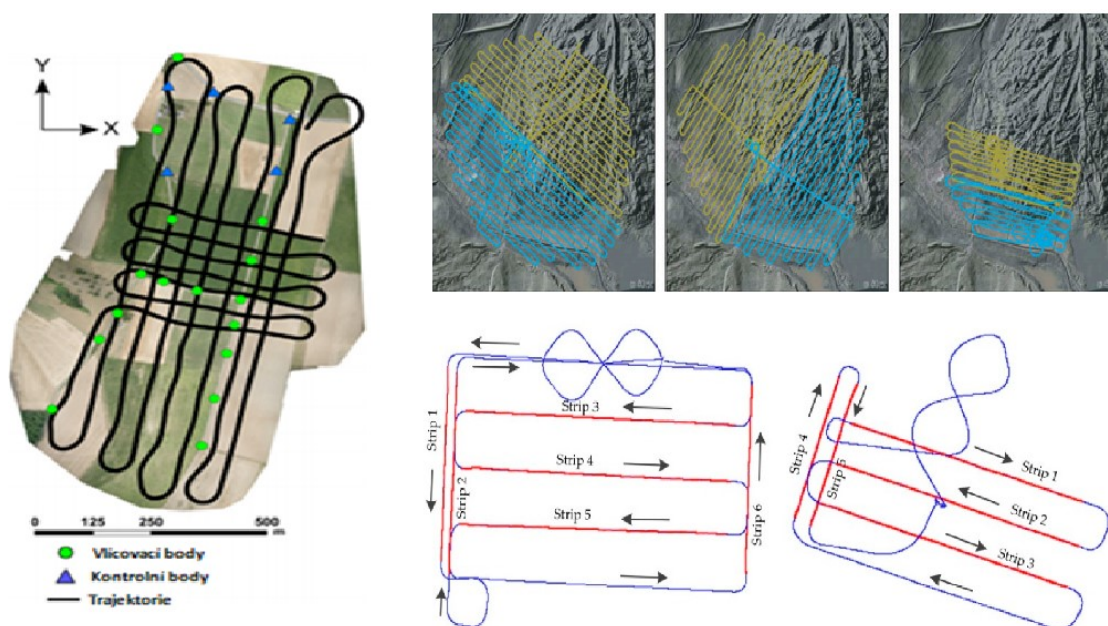
IMU jednotka využívá akcelerometry a gyroskopy, které měří odpovídajícím způsobem lineární a úhlové zrychlení. Jiné fyzikální veličiny (rychlost lineární/úhlová a poloha) jsou nejčastěji určovány integrací v procesu spojení IMU a GNSS. IMU jednotka je schopna získat počáteční směr pohybu měřením ve směru gravitačního tahu (zrychlení). IMU jednotky se navíc vybavují magnetometry, které zpřesňují polohu jednotky, a čidlem okolního tlaku, které zlepšuje měření nadmořské výšky. Lépe vybavené IMU jednotky také obsahují vlastní GNSS senzor (bez integrace do výpočtu kontrolní, monitorovací a záznamové jednotky) pro lepší výpočet trajektorie (Cucci a kol. 2017; Trafina 2018; Yang 2018).

O data z laserového skeneru, IMU a GNSS jednotky se stará kontrolní, monitorovací a záznamová jednotka. Zatímco data ze skeneru jsou připojena jako neměnná jednotka (použijí se pouze souřadnice spočtené z polární metody), GNSS přijímač registruje v určitém časovém odstupu polohu přístroje (formát souřadnic x, y, z). IMU jednotka zaznamenává gyroskopy a akcelerometry rotaci přístroje. Z parametrů GNSS a IMU jednotky se pomocí kalmanova filtru (KF) dopočítá trajektorie dráhy UAV (souřadnice a rotace). K této trajektorii se připojí bodové mračno z laserového skenu (Skaloud a kol. 2006; Cucci a kol. 2017 a Trafina 2018).

2.4 Plán letu

Samotné skenování probíhá automatizovaně, případně může operátor nastavit určité parametry, a to skenovanou oblast (plán letu) a hustotu skenování. Hustota skenování je charakterizována jako vzdálenost sousedních bodů v naskenovaném mračnu. Hustotu je také možné nastavit jako úhlový krok v horizontálním nebo vertikálním směru. Dalšími parametry, které lze nastavit jsou: maximální nebo minimální měřená délka či maximální úhel od nadíru letu (Baltasvias 1999b; Jašek 2018).

Plán letu se řídí oblastí vybranou pro skenování. Plán letu UAV je operátorem stanoven před samotným letem. Let je uskutečňován nad vybranou oblastí a standardně probíhá v jednom směru (obr. 2.7 vpravo). Pro větší hustotu bodového mračna je možné k příčnému směru přidat směr podélný (obr. 2.7 vlevo). Jakmile je plán letu operátorem zadán, proces skenování a letu je plně automatizován. V průběhu letu jsou naskenovaná data ukládána do paměti přístroje (Persad a kol. 2015; Moudry a kol. 2019).



Obrázek 2.7: Plán letu a případné umístění vlícovacích a kontrolních bodů (vlevo přeloženo: Cucci a kol. 2017, s. 8; vpravo nahoře Moudry a kol. 2019; vpravo dole Li a kol. 2019)

Součástí plánu letu je rozvrhnutí tzv. vlícovacích bodů, případně bodů kontrolních (obr. 2.8). Je sice možné skenovat bez vlícovacích bodů (pouze za použití registrace IMU jednotky), přesto pro větší přesnost jsou vlícovací body používány. Před samotným letem jsou zaměřeny pozemní metodou – GNSS nebo totální stanicí. Vlícovací body jsou používány k registraci bodového mračna do vybraného souřadnicového systému. Kontrolní body jsou

body, na nichž lze kontrolovat přesnost geometrie zaměřeného bodového mračka pomocí reziduí mezi bodovým mračnem a zaměřeným skutečným stavem. Případně je lze použít jako kontrolu přímé georeference (viz níže).

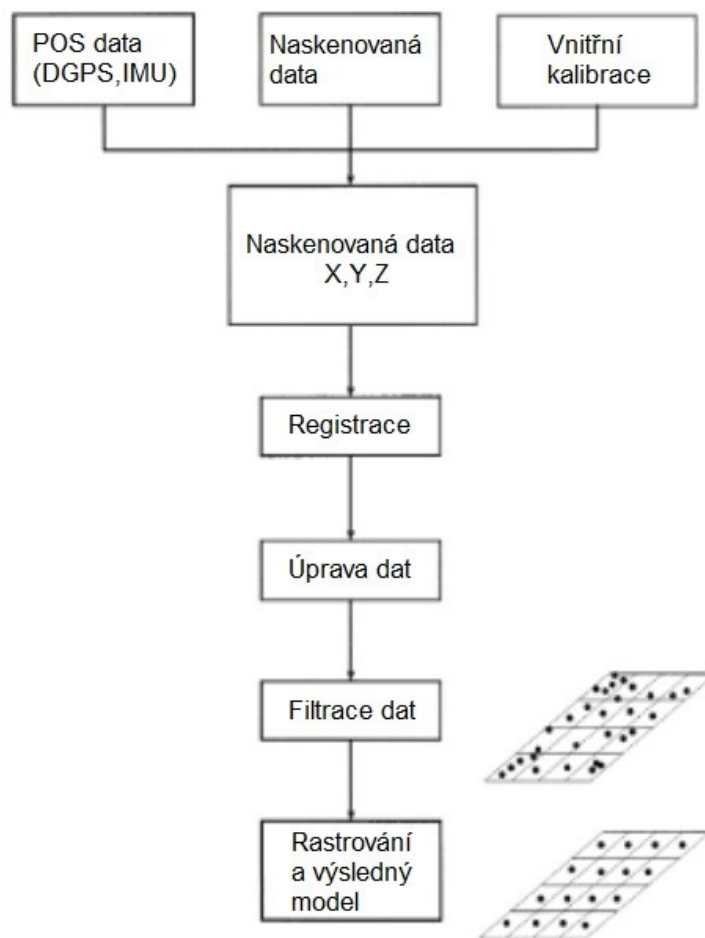


Obrázek 2.8: Vlícovací bod – vlevo – použití terče měření Nechranická přehrada; vpravo – koule pro účely skenování – lokalita Horní Vidim

2.5 Zpracování měření UAV

2.5.1 Post-processing

Proces zpracování dat z laserových skenerů (obr. 2.9) se u jednotlivých metod, myšleno terestrické skenování, UAV skenování nebo ALS skenování, mírně liší. Zatímco terestrické skenování probíhá pomocí stanovisek (jedno stanoviště laserového skeneru – jedno bodové mračno), při ALS a UAV skenování probíhá spojování mračen při procesu v hlavní jednotce (synchronizace laserového skeneru a IMU/GNSS). Proces zpracování probíhá u terestrického i leteckého skenování podobně (Glennie 2007; Yancho a kol. 2019).



Obrázek 2.9: Proces zpracování leteckých laserových dat (přeloženo: Wehl a kol. 1999, s. 79)

2.5.2 Přímé georeferencování

První částí procesu zpracování je přímá georeference trajektorie dráhy UAV, která transformuje trajektorii do zvoleného souřadnicového systému. Při inicializaci trajektorie dráhy se dopočítává dráha UAV na principu transformace polohy GNSS (v určitém polohovém systému a času). Během tohoto procesu je brán zřetel na vnitřní kalibraci (LA - *lever-arm offset* a BA - *boresight angles* viz níže) senzoru IMU/GNSS a LiDARu. Při kalibraci probíhá registrace metodou relativního slícování pomocí překrytu. Tato metoda spočívá v principu hledání dvou bodů v rámci dvou množin (pomocí euklidovské vzdálenosti) a porovnávání střední kvadratické vzdálenosti. Při výpočtu se využívá například metoda ICP (Iterative Closest Point), případně i jiné metody (viz Kornus a kol. 2003; Habib a kol. 2008; Jašek 2018 cit. Štroner 2008; viz níže LA a BA kalibrace). Při řešení georeferencování

(registrace dat) je důležité zmínit, že se jedná o složitý výpočet z důvodu zapojení více systémů souřadnic. Věnují se jí například Skaloud (2006), Habib (2008) nebo Rehak (2017).

Laserové skenery měří pomocí polární metody. Laserový skener však zde, oproti pozemnímu skenování, neměří zenitový úhel. Polární metodu tak vyjádříme následovně (Li a kol. 2019):

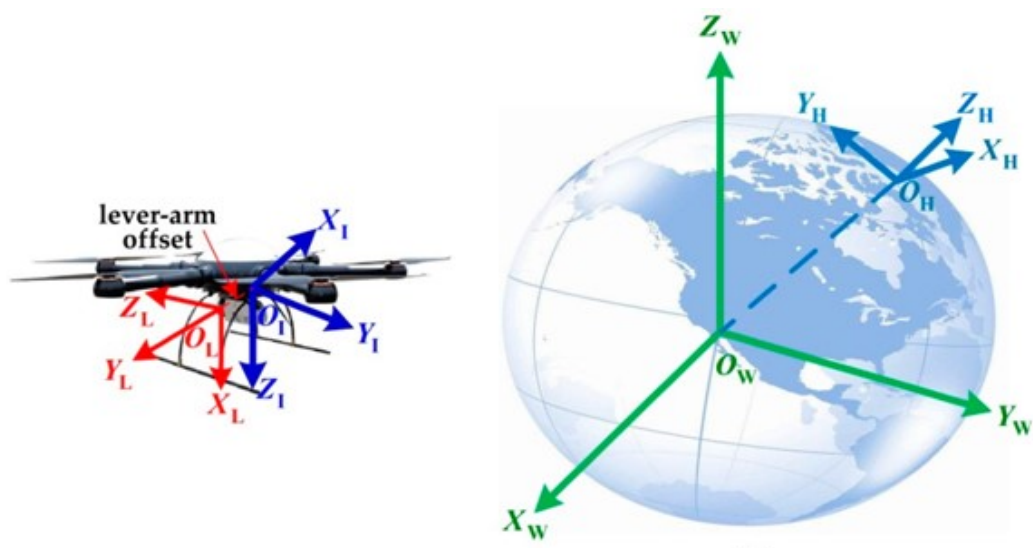
$$X_L = d \cdot \cos(\omega)$$

$$Y_L = d \cdot \sin(\omega) \quad (2.5),$$

kde: d je měřená délka;

ω je měřený úhel.

Do výpočtu se vkládají čtyři různé souřadnicové systémy (obr. 2.10). Systém laserového skeneru (střed O_L – $X_L Y_L Z_L$), souřadnicový systém IMU jednotky (střed O_I – $X_I Y_I Z_I$), systém místního souřadnicového systému (střed O_H – $X_H Y_H Z_H$) a souřadnicový systém WGS84 (střed O_W – $X_W Y_W Z_W$). Komunikace GNSS a IMU jednotky zajišťuje náklon a směr trajektorie pro místní souřadnicový systém. Krom toho GNSS jednotka poskytuje zeměpisnou délku, šířku a výšku elipsoidu WGS84 (Rehak a kol. 2017; Li a kol. 2019).



Obrázek 2.10: Kalibrace systematických posunů a rotací pomocí přímého georeferencování (Li a kol. 2019)

Výpočet přímého georeferencování je dán rovnicí:

$$p = R_H^W(B, L)R_I^H(r, p, h)(R_L^I(\varphi, \omega, \kappa) + t_L^I(x_0, y_0, z_0)) + t_H^W(B, L, H) \quad (2.6),$$

kde:

p	je polohový vektor v systému WGS84;
R_H^V	je matice rotace souřadnicových systémů mezi LiDAREm a IMU jednotkou;
t_L^I	je poloha laserového skeneru v souřadnicovém systému IMU;
φ, ω, κ	jsou úhly BA kalibrace mezi laserovým skenerem a systémem IMU/GNSS;
x_0, y_0, z_0	jsou difference mezi laserovým skenerem a systémem IMU/GNSS (LA kalibrace);
R_I^H	je matice rotace mezi systémem IMU a místním souřadnicovým systémem;
R_H^W	je matice rotace mezi místním systémem a systémem WGS84;
t_H^W	je poloha UAV v systému WGS84;
B, L, H	jsou zeměpisná šířka, délka a výška nad elipsoidem spočtené z IMU/GNSS jednotky a
r, p, h	jsou úhly, rychlost a směr dané IMU/GNSS jednotkou

(Rehak a kol. 2017; Li a kol. 2019; odvození je například v Habib a kol. 2011).

Výsledkem je registrované bodové mračno, které charakterizuje prostorové informace o skenovaném území či objektu (Skaloud a kol. 2008). Součástí výstupu jsou tedy 3D souřadnice a případně další údaje (intenzita odraženého signálu, pořadí odrazu paprsku, celkový počet odrazů vyslaného signálu, šířka echa apod.). Pokud je laserový skener vybaven CCD, je možné získat barevnou informaci bodů. Případně post-procesingem je možné získat barvu mračna z externě pořízených snímků (Wehl a kol. 1999; Jašek 2018). Jestliže chce uživatel naskenované mračno dále registrovat, respektive ho analytickými metodami přesněji transformovat do daného referenčního souřadnicového systému, je možné provést transformaci (např. Helmertovou sedmiprvkovou transformací) přes vlíčovací body.

2.5.3 Úprava dat

Pro některé konkrétní účely je možné použít přímo bodové mračno. Přesto ve většině případů je třeba zpracovat bodové mračno se zřetelem ke konkrétnímu účelu. Jednou z metod úpravy a interpretace bodového mračna je proložení mračna bodů geometrickými útvary. Výhodou této interpretace je redukce množství dat. Výsledkem pak je 3D model složený z geometricky definovaných těles. Takovéto zpracování je možné editovat v programech CAD (např. formát BIM 360 pro 3D modely budov) nebo Sketch Up (vizualizace historických objektů) apod. Tento způsob je využíván pro umělé objekty, jako je například interiér výrobních hal či elektráren. Další možnou úpravou je vytvoření drátového modelu. Tento způsob je primárně určen pro potřeby projektantů, případně architektů, jelikož hrany objektů jsou charakterizovány liniemi nebo křivkami. Další metodou zpracování jsou trojúhelníkové sítě, tj. vytvoření meshe nebo TIN. Toto zpracování vychází z předpokladu, že nelze vytvořit geometrická primitiva (křivky, linie apod.). Metoda pracuje na principu „Delaunayovy triangulace“ – algoritmy vypočítávají konstrukci konvexní obálky kolem jednotlivých bodů. Výsledné trojúhelníky musejí být co nejvíce rovnostranné a uvnitř kružnice opsané nesmí ležet žádný další bod. Tento výstup se využívá především pro přírodní objekty nebo pro extravilán (Ježek 2015; Krsak a kol. 2016; Jašek 2018).

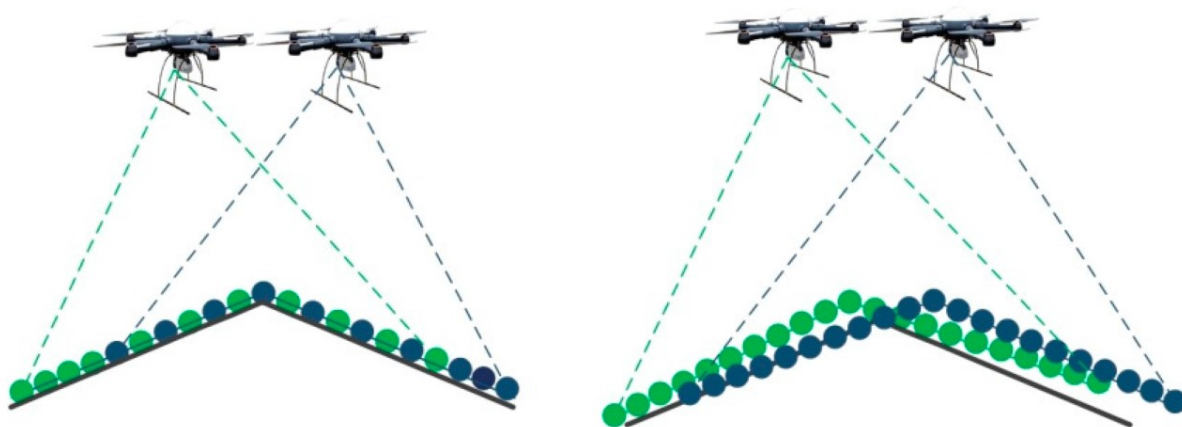
Další částí zpracování měření je filtrace a úprava dat (Yilmaz a kol. 2018). V tomto kroku je nutno odstranit nepotřebná data, případně chyby měření (šum), tedy například zachycená auta, chodce či chybné odrazy laserového skeneru. Při filtraci je nutno filtračním procesem (algoritmus filtrace) odstranit vlivy chyby měření. V tomto případě je možné taktéž klasifikovat objekty (Štroner a kol. 2008; Walsh a kol. 2013; Jašek 2018).

Posledním krokem je vizualizace bodového mračna. Vizualizovat můžeme také pouze bodové mračno. Vizualizace probíhá pomocí specializovaných programů nebo pomocí webové služby. Práci s bodovým mračnem umožňuje například open-source program Cloud Compare (EDF R&D), RiProcess (RIEGL), Cyclone 3DR (Hexagon) nebo 3D Reshaper (Hexagon). Webová služba potree.org (služba github) zase umožňuje vizualizace bodových mraček pomocí webových služeb (úprava v JavaScript). Bodové mračno může být uloženo hned v několika formátech (ASCII – txt, csv; LAS cloud – las, laz – komprimovaný soubor; e57 cloud; ptx cloud; dxf geometry nebo Riegel files – rds). V případě výstupu textového souboru (ve formátu x, y, z) je možné zobrazit bodové mračno pomocí programovacích jazyků nebo MATLABu a Octavu.

2.6 Kalibrace laserového skenování UAV

Pro větší přesnost zaměření bodů (potažmo bodového mračka) je nutno provést kalibraci (Wehl a kol. 1999). Kalibrací UAV se rozumí výpočet parametrů, které způsobují systematické chyby. U systému UAV laserového skenování lze chyby rozdělit do několika typů (Rehak a kol. 2017; Li a kol. 2019):

- chyba laserového skeneru,
- chyba polohy měřené GNSS aparaturou,
- chyba IMU jednotky,
- chyba vektoru rozdílů středů IMU/GNSS jednotky a LiDARu (*lever-arm offset*),
- chyba paralelního usazení středů IMU/GNSS jednotky a LiDARu (*boresight angles*).



Obrázek 2.11: Chyba měření laserového skeneru UAV (Li a kol. 2019)

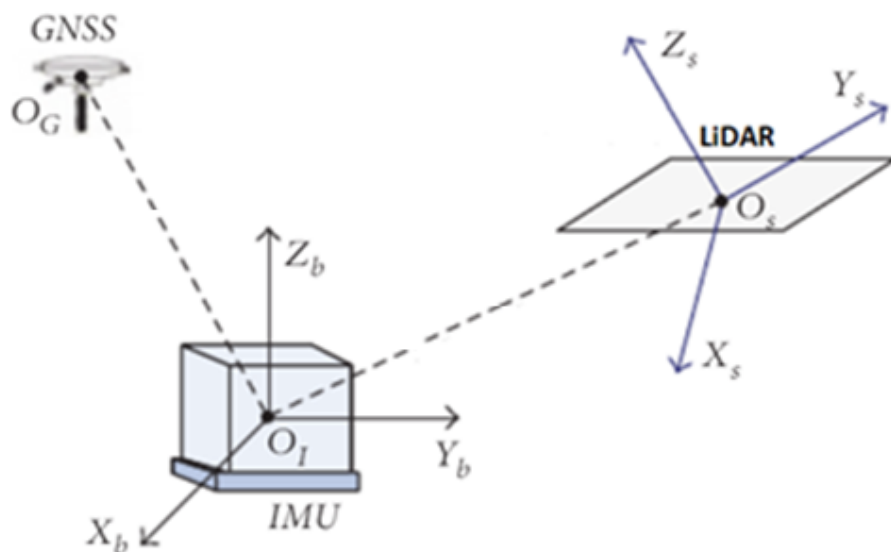
Tyto chyby způsobují, že mezi body mračen naskenovaných z různých směrů, případně různých pásů existují odchylky a nemohou se zcela shodovat (obr. 2.11) (Li a kol. 2019). Vzhledem k relativně neměnnému systému laserového skenování, který vykazuje nepřesnost jako celek (tj. všechny body změřené laserovým skenerem mají přibližně stejnou chybu), je potřeba si uvědomit, že současné laserové skenery mají přesnost v řádu milimetrů. Chyba laserového skeneru je především způsobena technickým charakterem přístroje. Mezi chyby laserového skeneru můžeme zařadit chybu vnitřních hodin, vliv atmosférické refrakce, chybu určení úhlu zrcadla nebo chybu geometrie skenovaných objektů (Jašek 2018 nebo Li a kol. 2019). Přesto by pro dosažení nejlepší přesnosti bylo možné přidat i vliv a výpočet přesnosti laserového skenování. Chyby GNSS aparaturou jsou způsobené především charakterem letu (například let u vysokých budov apod.). Tento vliv lze dále započítávat

do výsledných kalibrací, lze jej však kompenzovat zvolením vhodné letové hladiny (Rehak a kol. 2015; Li a kol. 2019). Chyba IMU jednotky je spíše věcí technického rázu. Cucci (2017) zmiňuje, že gyroskopické měření je zatíženo především chybami odklonu a šumu synchronizace dat. Tyto chyby jsou zastoupeny v celém bodovém mračku nerovnoměrně, závisejí totiž na výšce letu nebo směru letu. Pokud jsou dodrženy určité standardy letu, v rámci nichž je brán zřetel na charakter měření pomocí GNSS, lze chyby IMU jednotky, GNSS aparatury i LiDARu považovat za zanedbatelné (Li a kol. 2019).

Dominantně se přesto musejí kalibrovat, podle Wehla (1999), Rehaka (2015) nebo Liho (2019), především tyto dva parametry: chyba vektoru rozdílů středů IMU/GNSS jednotky a LiDARu (orig. *lever-arm offset*) a chyba paralelního usazení středů IMU/GNSS jednotky a LiDARu (orig. *boresight angles*). Tyto zdroje systematických chyb měření UAV laserového skenování lze matematicky velmi dobře spočítat a napravit pomocí minimalizace nesourodstí mračen bodů.

2.6.1 Kalibrace chyby vektoru rozdílů středů IMU/GNSS jednotky (*lever-arm offset*)

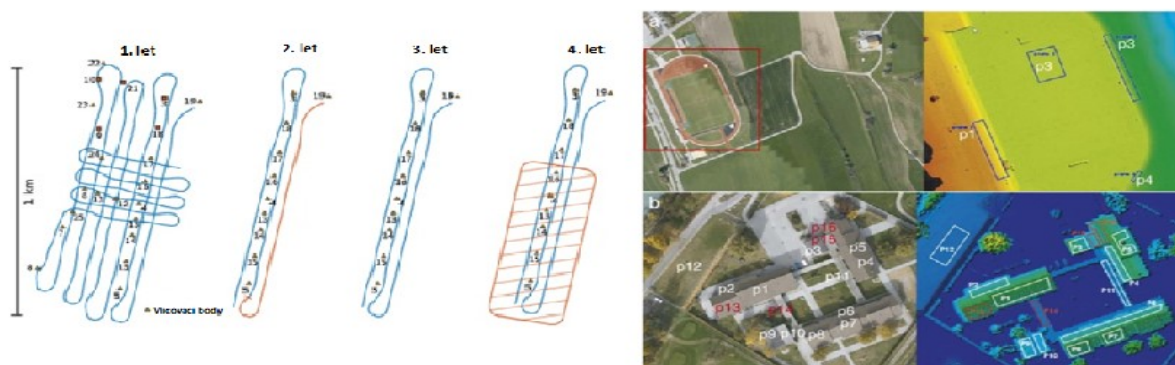
Senzory IMU/GNSS a LiDARu jsou na UAV platformě pevně instalované, jejich středy nejsou totožné. Vektor rozdílů jejich středů je označován jako *lever-arm offsets* (dále označíme jako LA kalibraci) (Li a kol. 2019). Toto odsazení je získáno z konstrukčních výkresů nebo je ihned měřeno po sestavení UAV platformy. Jedná se o tři posuny (x , y , z), které charakterizují vektor rozdílů počátků souřadnicových os senzorů (obr. 2.12 počátky O_I a O_S). Chyby, respektive rezidua z konstrukčního protokolu posunu jsou zanedbatelné. Přesto je lze vypočítat pomocí metody kalibračního pole (viz Cucci a kol. 2017 nebo Li a kol. 2019) nebo pomocí vyrovnání MNČ s BA kalibrací (viz níže).



Obrázek 2.12: Poloha jednotlivých senzorů (přeloženo: Li a kol. 2017)

2.6.2 Kalibrace paralelního usazení středů senzorů (*boresight angles*)

Dalším problémem způsobujícím systematickou chybu (viz teorie chyb podle Nováka a kol. 1998; Skaloud a kol. 2006) je chyba paralelního usazení středů IMU/GNSS jednotky a LiDARu (*orig. boresight angles*; dále jako BA kalibrace), které charakterizují úhlový rozdíl jednotlivých os LiDARu a IMU. Na rozdíl od odsazení, kde jsou posuny středů známy z konstrukce UAV platformy (to znamená polohou) jednotlivých senzorů IMU/GNSS a LiDARu, paralelní usazení středů senzorů (BA) nelze z konstrukce měřit (Stocker a kol. 2017; Li a kol. 2019). Tímto je dáno, že BA nelze měřit přímo a je nutné je správně kalibrovat uživatelským nastavením nebo pomocí metody nejmenších čtverců z naskenovaných mračen bodů. Jedná se tudíž o geometrickou kalibraci. Uživatelské nastavení BA (ω , ϕ , κ , *orig. roll, pitch, yaw*) je proces pokusu a omylu a vyžaduje velkou zkušenost operátora. Autoři Rehak (2015) nebo Li (2019) uvádějí, že nejvhodnější jsou automatizované metody kalibrace BA. Po kalibraci senzoru existuje stále systematická chyba, ale je výrazně nižší. Je také nutné tuto kalibraci opakovat, protože se charakterem přístroje časově mění, to znamená, že není stabilní (Rehak a kol. 2015; Cucci a kol. 2017).



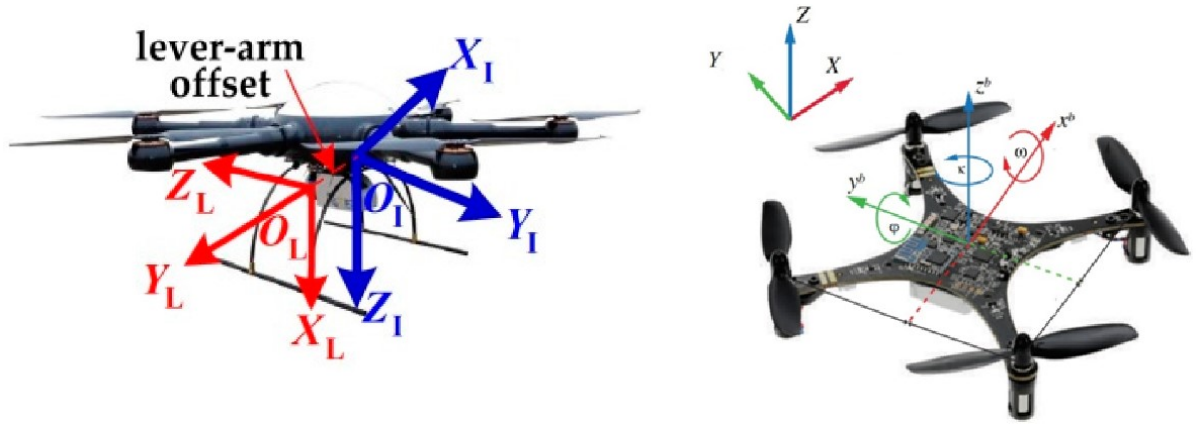
Obrázek 2.13: Použité metody pro kalibraci BA –Vlevo: Přelety různými směry (trajektorie UAV) (přeloženo: Cucci a kol. 2017, s. 8); Vpravo: Porovnání vhodnosti využití stadionu a zastavěné plochy pro potřeby kalibrace (Skaloud a kol. 2006, s. 52)

Automatizovaných metod BA kalibrace je několik (obr. 2.13). Skaloud (2006) zkouší pro BA kalibraci řešení pomocí referenčních ploch (jako např. rovinatý terén, velké sportovní hřiště nebo stadiony a rohy budov). Kalibraci provádí z orientace a polohy různých rovinných ploch a slícování jejich absolutní polohy v polohovém souřadnicovém systému. Rehak (2015) využívá pro velmi přesnou kalibraci senzoru kalibrační pole na malém prostoru. Tuto BA kalibraci senzoru IMU/GNSS provádí na rovné střeše stavebního objektu o rozměrech 10×10 metrů. Body kalibračního pole a anténa UAV mohou být pro tuto metodu zaměřeny totální stanicí (Rehak a kol. 2015). Li (2019, cit. Filin 2003 a Kornus a kol. 2003) zmiňuje metodu, která je založena na hledání povrchů, jež jsou více odrazivé, a podle těchto povrchů následně pomocí MNČ vypočítává BA kalibraci. Podmínka pro výpočet BA kalibrace pomocí MNČ je následující. Součet zbytku čtverců u hledaných ploch musí být co nejmenší:

$$\sum_{i=1}^N V_i^T V.$$

2.6.3 Vliv jednotlivých kalibračních parametrů

Další částí výpočtu při kalibraci BA je vliv jednotlivých parametrů (Skaloud a kol. 2006). Je samozřejmé, že největší vliv při skenování UAV platformou má nastavení letové výšky. Li (2019) zmiňuje, že pozemní nebo mobilní skenování má předpoklad větší hustoty naskenovaného mračna bodů. Proto je vhodné let UAV koncipovat tak, aby byla letová výška co nejnižší. S tímto souvisí chyba skenování – přesnost naskenovaného bodu se zvýší dlouhým dosahem skenování.



Obrázek 2.14: Vlevo – souřadnicové osy IMU a LiDARu, Vpravo - posuny x, y, z a rotace ω , φ , κ v centru snímáče (Vlevo upravený Li a kol. 2019; vpravo Tu a kol. 2018)

Pro výpočet dominantního vlivu jedné z kalibračních jednotek je nutné si definovat chybový vektor IMU jednotky v důsledku BA a LA (obr. 2.14). Vznikne rovnice (Li a kol. 2019):

$$\begin{bmatrix} 0 & d\kappa & -d\omega \\ -d\kappa & 0 & d\varphi \\ d\omega & -d\varphi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & d\kappa & -d\omega \\ -d\kappa & 0 & d\varphi \\ d\omega & -d\varphi & 0 \end{bmatrix} R_I^L \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7),$$

kde R_I^L je matice rotace.

Z charakteristiky uložení senzorů na UAV platformě je rotační osa (Z) subsystému L laserového skeneru kolmá k svislé ose. Osa X laserového skeneru L je rovnoběžná s osou Z u subsystému I (IMU jednotka). Tudiž lze aproximovat úhel ω jako 90° a κ aproximujeme 90° . Poté lze odvodit rovnici (Li a kol. 2019):

$$\begin{bmatrix} 0 & -Z_I & Y_I \\ Z_I & 0 & -X_I \\ -Y_I & X_I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varphi \\ d\omega \\ d\kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X_L & Y_L \cos \varphi \\ X_L & 0 & -Y_L \sin \varphi \\ Y_L \cos \varphi & Y_L \sin \varphi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varphi \\ d\omega \\ d\kappa \end{bmatrix} \quad (2.8).$$

Aproximace úhlů je použita proto, že skenovací rovina je téměř kolmá ke směru letu. Skaloud (2006) nebo Li (2019) uvádějí, že diferenciál úhlu κ způsobuje mnohem menší vychýlení než úhly φ a ω . Proto dochází u kalibrační jednotky úhlu κ k obtížnému určení pomocí metod překrytu naskenovaných pásů; jinak řečeno, právě úhel κ je nejvíce zatížen na velkou změnu u naskenovaných sad měření, a proto ho není možné v rámci výpočtu globalizovat (viz Li a kol. 2019). Li (2019) dále z této výsledné rovnice odvozuje, že při kalibraci LA platformy UAV je naopak velmi malý vliv souřadnice Z.

Dalšími vlivy, které mohou výrazně ovlivnit přesnost naskenovaného mračna bodů, jsou, jak je řečeno výše, systematické chyby polohy GNSS jednotky. Jedná se především o průběh letu, kdy mohou například vysoké budovy negativně ovlivnit přesnost GNSS aparatury. V protokolu měření by v tomto směru měla být zmíněna přesnost GNSS pozice (PDOP). Další chybou, která se negativně projevuje na přesnosti a výrazně ji snižuje je rychlé otočení UAV (Habib a kol. 2008; Li a kol. 2019).

2.6.4 Výpočet modelu vyrovnání

Pro výpočet BA a LA¹ kalibrace se využívá výpočet pomocí MNČ. Základními parametry kalibrace BA a LA jsou tři úhly rotace (ω , φ , κ), vektor tří posunů (t_x , t_y , t_z) a měřítko m (měřítko někteří autoři opomíjejí). Tyto prvky tvoří sedmiprvkovou konformní transformaci, při které se body z množiny S_2 transformují do množiny S'_2 . Tato transformace minimalizuje vzdálenost k množině S_1 . Vzdálenost bodu $l \in S'_2$ od roviny $(P, Q, R) \subset S_1$ je dána rovnicí:

$$D = \frac{|a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \cdot z_i - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2.9),$$

kde a, b, c, d jsou funkcí $P(x_P, y_P, z_P)$, $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$ a $R(x_R, y_R, z_R)$ (Habib a kol. 2008; Wang a kol. 2010).

Pro hledání lokálního minima je nyní potřeba aproximovat vzdálenost D . Použijeme Taylorův rozvoj 1. řádu.

Linearizace dle Wanga (2010) (také Novák a kol. 1998: „vyrovnání měření“ a Skaloud a kol. 2006):

$$D' \sim D_0 + \frac{\partial D}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial D}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial D}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial D}{\partial t_x} \Delta t_x + \frac{\partial D}{\partial t_y} \Delta t_y + \frac{\partial D}{\partial t_z} \Delta t_z + \frac{\partial D}{\partial m} \Delta m \quad (2.10),$$

kde D_0 je počáteční odhad vzdálenosti D daným nevyrovnanými parametry $\Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa, \Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z$ a Δm .

Definujeme V , jež je rozdílem mezi aproximovanou vzdáleností D' a skutečnou vzdáleností D :

¹ Skaloud (2006) uvádí, že se do modulu vyrovnání vkládají známé hodnoty LA kalibrace dané výrobcem nebo hodnoty z předchozího vyrovnání. Tyto hodnoty se následně přepočítávají následným vyrovnáním.

$$D = D' - V \quad (2.11),$$

kde V je řešení vyššího řádu Taylorova rozvoje.

V iteračním procesu je to vždy derivace vyššího řádu, než je řád při výpočtu D' . Výsledkem je difference nevyrovnaných parametrů. Při dalším kroku předpokládáme nulový posun vypočtených povrchů. Položíme proto $D = 0$. Následně můžeme zapsat:

$$V = D_0 + \frac{\partial D}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial D}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial D}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial D}{\partial t_x} \Delta t_x + \frac{\partial D}{\partial t_y} \Delta t_y + \frac{\partial D}{\partial t_z} \Delta t_z + \frac{\partial D}{\partial m} \Delta m \quad (2.12).$$

Takto výpočet probíhá, když rovnice 2.12 je rovna blízké nule. Následně spočteme vektor reziduí:

$$V = L + AX \quad (2.13),$$

kde A je matice plánu (jednotlivé derivace nevyrovnaných proměnných), V je vektor reziduí, L je vektor měření a X je vektor oprav (Skaloud a kol. 2006).

Podle Skalouda (2006) je oprava měřítka zanedbatelná, proto ho lze z výpočtu vyloučit (nalezené plochy slícování jsou většinou velmi malé oproti skenované oblasti). Pro výpočet směrodatné odchylky využijeme výpočtu střední chyby neznámých. Nejprve je nutno definovat vektor vyrovnaných měření:

$$\bar{L} = L + V \quad (2.14),$$

kde \bar{L} je vektor opravených měření.

Následně využijeme lineárního zobrazení (Wolf a kol. 1997; Hampacher a kol. 1997; Li a kol. 2019):

$$X = -(A^T A)^{-1} A^T \bar{L} \quad (2.15)$$

a poté odvodíme:

$$\Sigma_{XYZ} = -(A^T A)^{-1} A^T A (A^T A)^{-1} = (A^T A)^{-1} \quad (2.16)$$

Dostaneme kovarianční matici neznámých:

$$\Sigma_{XYZ} = \begin{bmatrix} \sigma_{\omega}^2 & \cdots & \sigma_{t_z \omega} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{\omega t_z} & \cdots & \sigma_{t_z}^2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

■ dle postupu Wolfa (1997); Skalouda (2006) nebo Habiba (2008). Na diagonále se nacházejí směrodatné odchylky jednotlivých parametrů. Následně spočteme směrodatnou odchylku, a to pomocí vektoru reziduí a matice plánů (vektor oprav, v češtině viz Hampacher a kol. 1997):

$$v = AX - L \quad (v = A\hat{x} - l \text{ viz Hampacher a kol. 1997}) \quad (2.18).$$

Poté vypočteme směrodatnou odchylku (Akca a kol. 2006):

$$\sigma = \sqrt{\frac{v^T v}{n-1}} \quad (2.19).$$

Tento iterační výpočet se provede pro p – bodů a q – ploch. Následně můžeme odvodit (Skaloud a kol. 2006):

Podmínky:	$m = p$
Neznámých:	$u = 6 + 6q$
Měřených veličin:	$n = 6n$
Stupně volnosti:	$r = p - 4 - 3q$

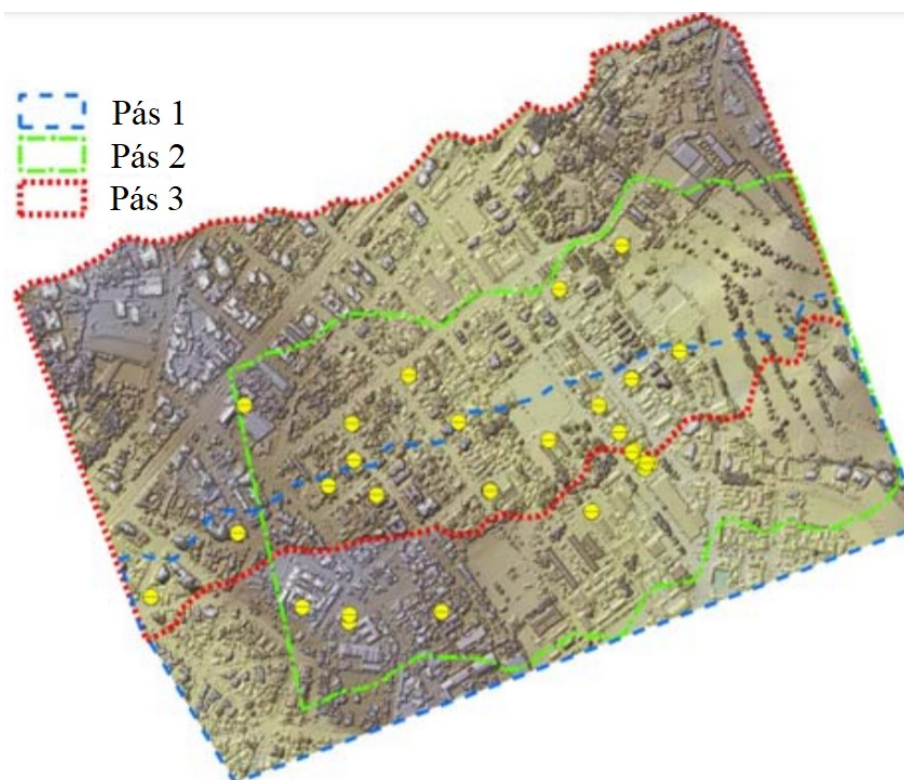
2.7 Vyrovnání naskenovaných pásů (*strip adjustment*)

Nezávisle na kalibraci LA i BA je při laserovém skenování UAV brán zřetel na dosaženou výslednou přesnost naskenovaného bodového mračna. Kalibrace LA i BA výslednou přesnost zvýší. Například Li (2019) zmiňuje přesnost kalibrovaného bodového mračna směrodatnou odchylkou od 3 cm (zlepšení v řádu jednotek centimetrů). Každopádně kalibrace LA i BA systematickou chybu zcela neeliminuje (Habib a kol. 2008).

Pro zpřesnění přesnosti bodového mračna se po provedení kalibrací může využít několika metod. Mnozí autoři (Gruen a kol. 2005; Skaloud a kol. 2006; Habib a kol. 2008 nebo Wang a kol. 2010) se zaměřují na princip rozdělení bodového mračna na tzv. pásy (*orig. strip adjustment* dále označíme jako SA; obr. 2.15). Ty následně mezi sebou vyrovnávají. Vosselman (2001) popisuje jednotlivé kroky „*strip adjusment*“ takto:

- Matematický model pro deformaci naskenovaných pásů,
- Výběr ploch slícování,

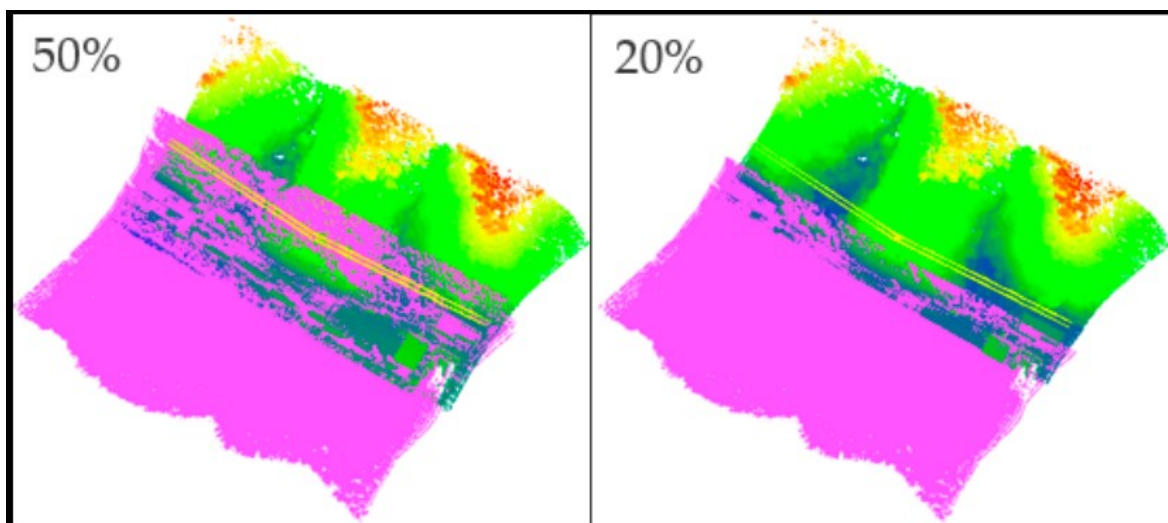
- Stochastický model (MNČ s Gauss-Markoffovým modelem),
- Kontrola dvou překrývajících se pásů.



Obrázek 2.15: Strip adjustment – naskenované plochy, žlutě jsou označeny kontrolní body (upravený a přeložený Habib a kol. 2008)

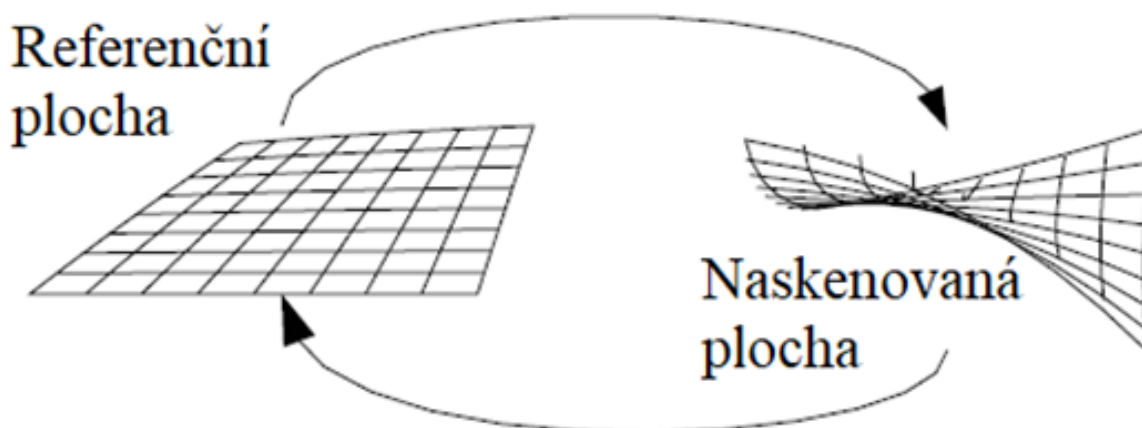
Princip rozdělení a vyrovnaní pásů se snaží minimalizovat rozdíly jednotlivých naskenovaných pásů pro daný transformační model. Pracuje na bázi vyrovnaní metodou nejmenších čtverců (podobně jako BA a LA kalibrace). Metoda vzájemně jednotlivé naskenované pásy posouvá (souřadnice x , y , z) a rotuje (ω , ϕ , κ). Tyto parametry jsou pro každý jednotlivý pás rozdílné. Jednotlivé pásy se transformují na nalezené plochy (Habib a kol. 2008). Plochy jsou hledané operátorem a jsou voleny na základě charakteru skenovaného území (Wang a kol. 2010 viz níže). Akca (2006) zavádí do výpočtu vyrovnaní metody nejmenších čtverců Gauss-Markoffův model pro eliminaci výrazných hodnot ve vektoru reziduí. Tento výpočet získává relativně objektivní odhad minimálního rozptylu pro neznámé parametry. Stejně tak Habib (2008) nebo Wang (2010) zavádějí do výpočtů MNČ robustní metodu, jež zpřesňuje slícování naskenovaných pásů. Další možnou variantou vyrovnaní pásů jsou dle Wehla (1999) nebo Cucciho (2017) přelety různými směry. Stocker (2017) uvádí, že právě tyto křížové lety zvýší výslednou přesnost slícování naskenovaných bodových mračen. Chen (2021) v tomto případě upřesňuje, že nezávisí

na směru letu, ale především na podílu překrytého naskenovaného území (obr. 2.16). Také zmiňuje (též Stocker a kol. 2017), že u vyrovnání pomocí SA je žádoucí omezit úhel skenování do 40° od trajektorie letu.



Obrázek 2.16: Překrytí pásů a omezení úhlu naskenovaného bodového mračka (upravený Chen a kol. 2021)

K jinému z dalších principů a přístupu k SA se staví Bretar (2004). Na rozdíl od výše zmíněných autorů se zaměřuje na tzv. referenční plochu (obr. 2.17). Bretar (2004) naskenoval jeden směr letu se stejnou trajektorií hned několikrát. Tyto naskenované pásy si vybral jako referenční a pomocí afinních transformací naskenovaná mračka bodů z křížových letů natransformoval na tyto referenční.



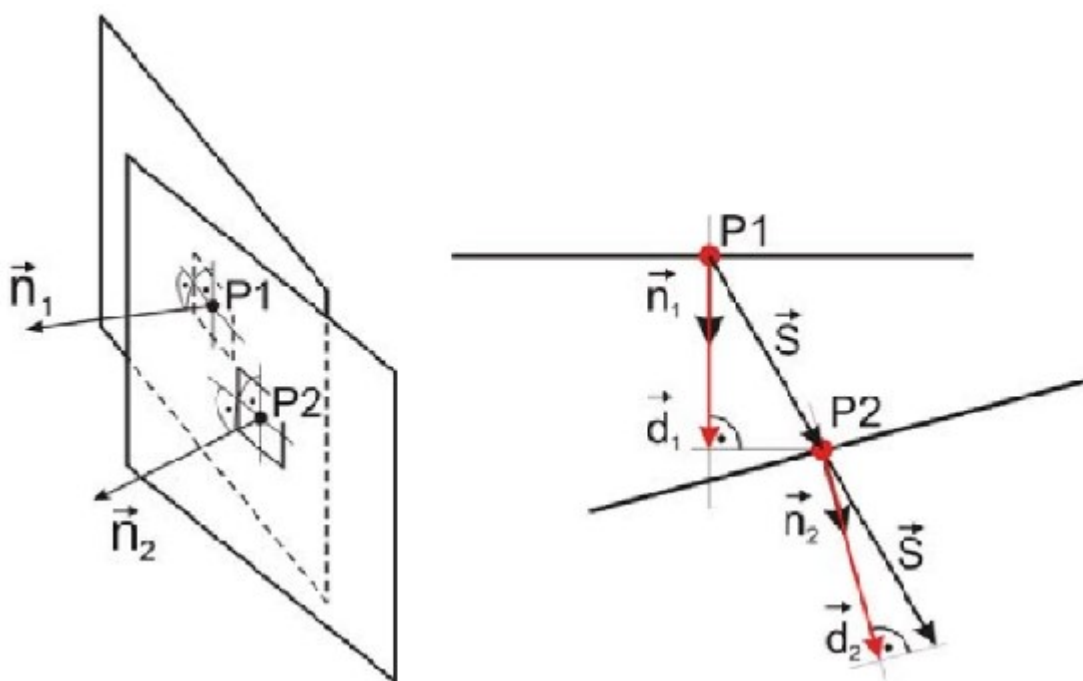
Obrázek 2.17: Strip adjustment – vyrovnání datové referenční plochy (upravený a přeložený Bretar a kol. 2004)

2.8 Parametry hledání společných ploch

V souvislosti s vyrovnaní pomocí pásů je potřeba zmínit hledání ploch pro slícování (orig. „*patch*“). Na rozdíl od BA kalibrace, která využívá pro výpočet kalibrace všechna naskenovaná data, vyrovnaní pomocí pásů se zaměřuje především na pásy, které se nacházejí vedle sebe, respektive mají dostatečný překryt (viz obr. 2.15) (Wang a kol. 2010; Chen a kol. 2021). Pro korespondenci dvou sousedních naskenovaných pásů nejsou nastaveny univerzální parametry. Tyto parametry jsou závislé především na charakteru naskenovaného území. Jak zmiňuje Vosselman (2001) je důležité vzít v potaz, kde je skenování uskutečněno a jaká je především hustota naskenovaných bodů. Hustota bodů by měla být brána na zřetel při rozhodování výběru korespondenčních ploch. Li (2017) zmiňuje, že pro každou naskenovanou sadu dat je vhodné zvolit jiný přístup k plochám slícování a pro každé jednotlivé měření si precizně definovat parametry hledání společných ploch slícování.

Mezi parametry hledání společných ploch slícování patří (Rieger a kol. 2008):

- rádius hledaných bodů,
- úhlová tolerance,
- maximální vzdálenost normály dvou hledaných ploch.



Obrázek 2.18: Strip adjustment – hledání ploch slícování (Rieger a kol. 2008)

Tyto parametry jsou určující pro hledání ploch pro slícování pomocí vyrovnání naskenovaných pásů. Zatímco hledání v poloze určuje velikost hledané plochy, úhlová tolerance určuje maximální sklon roviny. Tento parametr je využíván z důvodu hledání například střech domů. Maximální vzdálenost normály plochy zase určuje, o kolik mohou být jednotlivé hledané plochy od sebe výškově vzdáleny, tedy vzdálenost podél normál hledaných ploch. V zásadě se tudíž jedná o definování dvou ploch ve dvou pásech, jež mají být stejné (Akca a kol. 2006; Riegel a kol. 2008). Přesnost slícování dvou ploch definuje Rieger (2008) jako:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_1+d_2}{2}\right)^2}{n}} \quad (2.20),$$

kde $d_1 = (P_2 - P_1) \cdot \vec{n}_1$ a $d_2 = (P_2 - P_1) \cdot \vec{n}_2$ (viz obr. 2.18).

Li (2017) zmiňuje ještě definování pole pro hledání ploch (orig. „*plane searching*“), kde se definuje velikost jednotlivých ploch (tj. např. minimální počet bodů jedné plochy apod.).

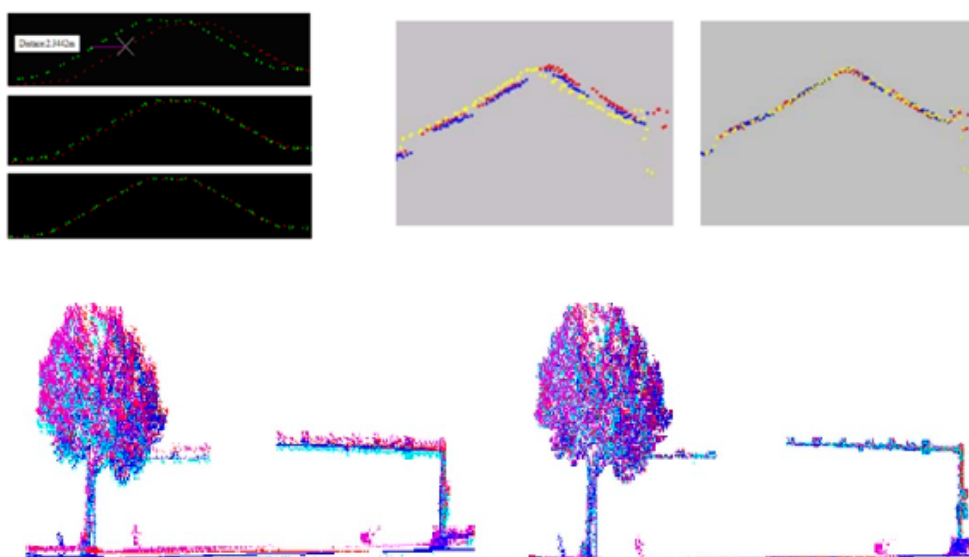
Slícování pomocí ploch však není jedinou metodou. Li (2017) nebo Junior (2019) uvádějí tři metody korespondence dat, které se standardně používají při SA:

- plocha a plocha (orig. „*patch-to-patch*“ popsáno výše),
- bod a plocha (orig. „*point-to-patch*“),
- bod a bod (orig. „*point-to-point*“).

Pro tuto práci právě uvedené metody korespondence naskenovaných pásů však neuvažujeme, a proto ani nejsou v teoretické části popsány (o metodách korespondence se více zmiňuje Bang a kol. 2008 popř. Rieger a kol. 2008). Softwary (například RiProcess) využívají označení ploch slícování jako „*tie points*“ (zde není analogie s metodou fotogrammetrie). Jelikož hledání společných prvků ve dvou naskenovaných pásech výrazně ovlivňuje výslednou přesnost, možností, jak hledat korespondenci, je mnoho. Další metodu zmiňuje například Skaloud (2006), který hledal jedinečné plochy slícování (orig. „*planar patches*“), kdy si zvolil například střechu budovy a podle ploch z jednotlivých bodových mračen hledal optimální posun a rotaci jednotlivých pásů.

2.9 Ověření přesnosti

Samostatnou kapitolou týkající se kalibrace senzoru UAV je ověření výsledku. K validaci výsledku kalibrace můžeme přistupovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je praktický přístup, při němž se nad určitým objektem udělá příčný řez (obr. 2.19). Tento způsob má však svoje úskalí. Závisí především na rozmanitosti skenovaného objektu. Není vhodný pro objekty, kde je velký naskenovaný šum, například pro lesní porost. Naopak je vhodný pro zástavbu, u níž je možné porovnávat stavební objekty (Habib a kol. 2008; Wang a kol. 2010).



Obrázek 2.19: Příčný řez – před kalibrací a po kalibraci senzoru – praktický přístup (vlevo: Wang a kol. 2010; vpravo: Habib a kol. 2008; dole: Li a kol. 2019)

Druhý způsob validace dat je analytický – na kontrolních bodech jsou měřena rezidua dvou měření. Kontrolní body jako validaci využívá mnoho autorů (viz Habib a kol. 2008; Rehak a kol. 2013; Grigillo a kol. 2018; Urban a kol. 2018 nebo Zieher a kol. 2019). Způsob měření dvou reziduí je založen na geometrickém rozložení objektů měření. Je to stejný analytický způsob jako při kalibraci senzoru, ovšem s tím rozdílem, že difference nejsou v rámci ploch, ale bodů. Tyto body mohou být zaměřeny geodetickou metodou (Blistan a kol. 2016; Koska a kol. 2017) nebo mohou být určeny druhým bodovým mračnem (Urban a kol. 2018). Výpočet vychází z předpokladu:

$$\Delta_{pi} = \sqrt{\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2 + \Delta_{zi}^2} . \quad (2.21),$$

kde Δ_{xi} , Δ_{yi} a Δ_{zi} jsou rozdíly souřadnic dvou rozlišovaných bodů (Urban a kol. 2018).

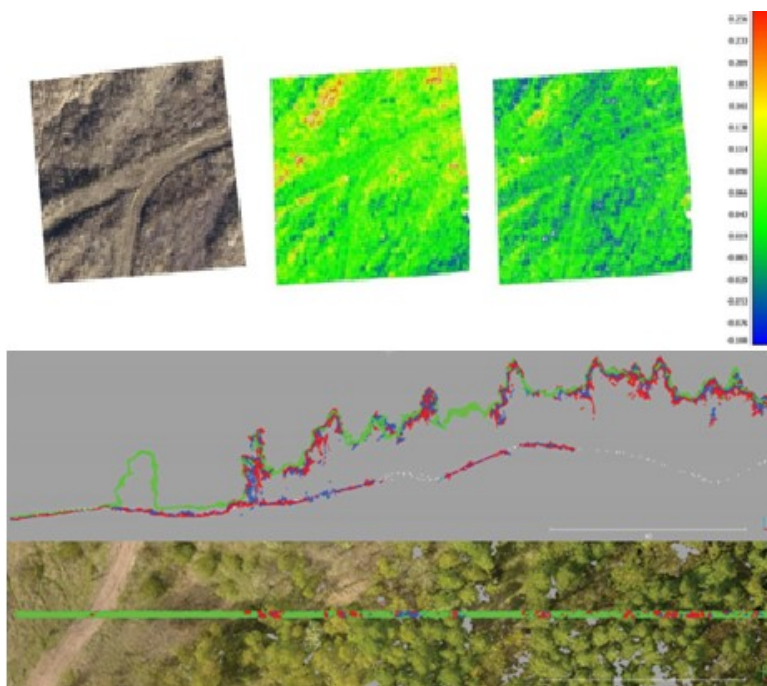
Můžeme tak spočítat střední kvadratickou odchylku a směrodatnou odchylku. Střední kvadratická odchylka se spočte (Koska a kol. 2017; Urban a kol. 2018):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{REF})^2}{N}} \quad (2.22)$$

a směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2.23).$$

Tento postup je analyticky stejný jako při výpočtu kalibrace senzoru. V tomto případě jsou však porovnávány body, nikoli plochy (odvození viz Urban a kol. 2018). Stejně jako lze porovnávat a určovat vzájemnou geometrii bodů v bodovém mračnu, tak lze porovnávat dvě mračna (Urban a kol. 2018). Je možné porovnávat dvě mračna změřená nezávisle na sobě – jeden přístroj a dvě nezávislá měření (např. Habib a kol. 2008). Nebo je možné porovnávat dvě bodová mračna získaná rozdílnou metodou – UAV a pozemní skener (Elsner a kol. 2018), UAV a TLS (Baltsavias 1999a), UAV a fotogrammetrie (Blistan a kol. 2016) (obr. 2.20).

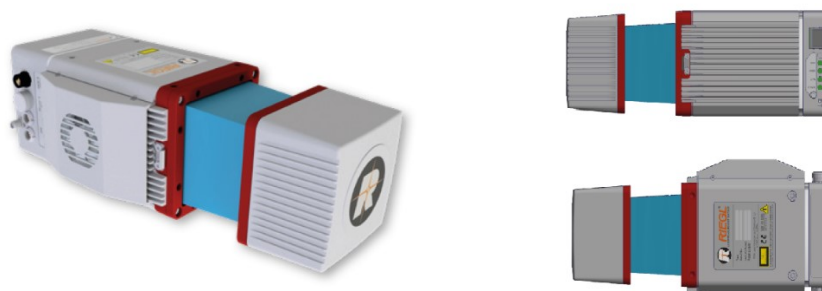


Obrázek 2.20: Nahoře: Výšková rezidua dvou vybraných naskenovaných mračen (Urban a kol. 2018, s. 334);
dole: Příčný profil a rozdíly tří naskenovaných mračen (Koska a kol. 2017)

3. Zájmové území a použitá data

3.1 Použitý přístroj

Pro statistické zhodnocení přesností kalibrací UAV a jiných metod zpřesňování bodového mračka byl použit přístroj RIEGL miniVUX-1UAV (obr. 3.1).



Obrázek 3.1: Skener RIEGL miniVUX-1UAV (Upraveno – RIEGL 2020)

RIEGL miniVUX-1UAV je letecký laserový skener určený speciálně pro platformu UAV. Výrobce uvádí, že je vhodný pro obory zemědělství, lesnictví, archeologie, monitoringu, mapování ledovců nebo geotechniky. Základní technické parametry jsou obsaženy v následující tabulce (Eker a kol. 2017; RIEGL 2020; tab. 3.1). Skener byl pevně spojen s nosičem – hexakoptérou DJI M600. Tělo skeneru bylo propojeno s IMU/GNSS jednotkou typu APX 15 UAV.

Technické parametry skeneru RIEGL miniVUX-1UAV	
Minimální dosah laseru	3 m
Maximální dosah laseru	250 m
Přesnost měření vzdálenosti	10 mm ve vzdálenosti 150 m
Vlnová délka laseru	Blízké infračervené záření
Mechanismus rozmítání laserového paprsku	Rozmítání pomocí zrcadla
Maximální úhel snímání	360 °
Frekvence laserového skenování	100 kHz

Tabulka 3.1: Technické parametry skeneru RIEGL miniVUX-1UAV (Upraveno – RIEGL 2020)

3.2 Oblast Horní Vidim

3.2.1 Charakteristika zájmového území

Jedno ze zájmových území (testovací plocha) bylo vybráno s ohledem k rozmanitosti reliéfu. První testovací plocha se nachází u obce Horní Vidim v okrese Mělník. Tato obec leží na území chráněné krajinné oblasti Kokořínsko. Pro potřebu skenování byl vybrán jižní cíp obce. Na ortofotu (obr. 3.2) lze spatřit, že se v oblasti nachází travní porost, asfaltová cesta, polní cesta, betonová plocha, budovy (kaplička pod velkým stromem), trafostanice, posečené pole a remízky. V jižní části skenované oblasti byla místní skládka bioodpadu. V severní části skenované oblasti stojí dvě budovy, které jsou však zakryty zeleným porostem. Převýšení v této skenované oblasti není velké. Nachází se zde pouze násyp polní cesty. Co se týká objektů, v této oblasti pro skenování dominantních, roste zde vysoký strom nad kapličkou a stojí zde sloupky nízkého napětí. Vybrané území můžeme označit jako extravilán.

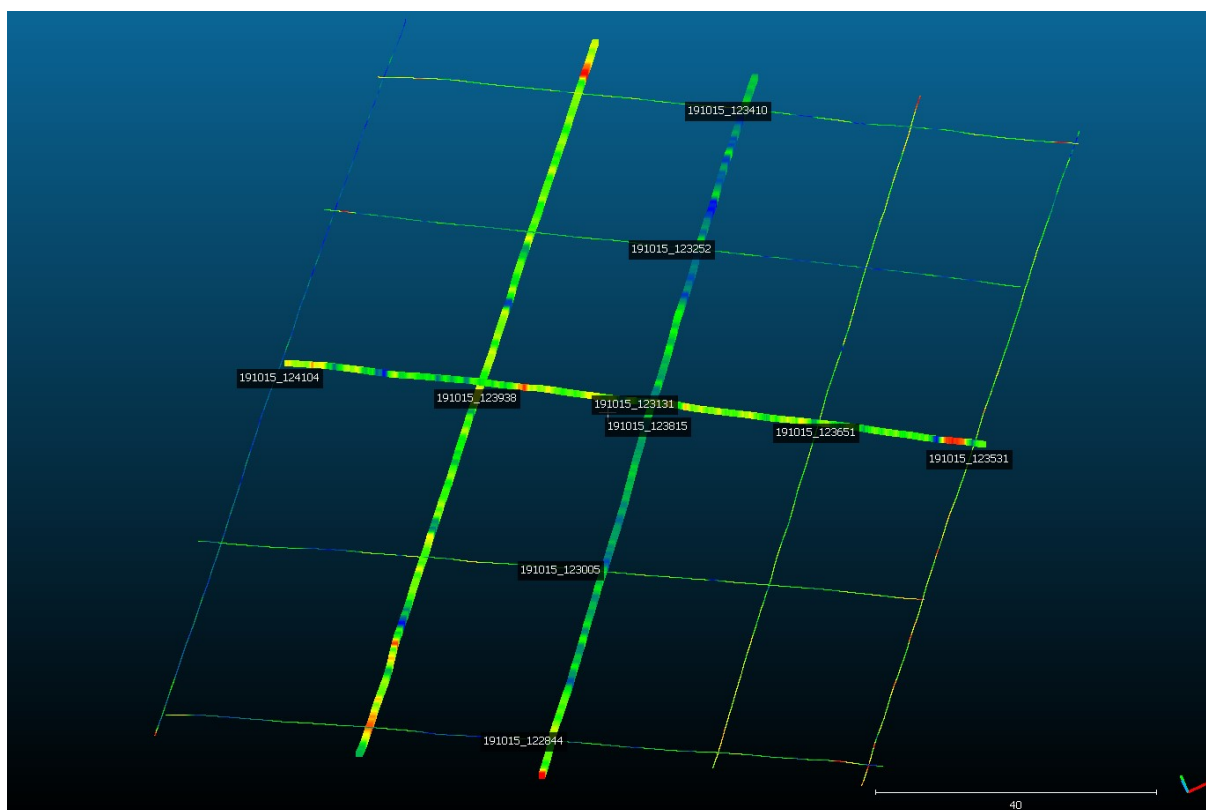
Tato lokalita byla vybrána právě pro svou rozmanitost. Skaloud (2006) a Elsner (2018) se zmiňují, že pro co nejlepší výsledky slícování dat, kalibrace nebo porovnání ruční GNSS a UAV měření je vhodná právě lokalita s největší rozmanitostí povrchu reliéfu a zároveň s co nejmenším podílem vysoké vegetace. Předpokladem pro nejlepší testovací oblast je tedy oblast s největším rozdílem odrazivosti jednotlivých ploch. Dále Wang (2010) uvádí, že pro potřebu vyrovnání pomocí pásů není vhodná oblast s vysokou vegetací.



Obrázek 3.2: Experimentální oblast Horní Vidim – ortofoto (zdroj: Mapy.cz)

3.2.2 Použitá data UAV

Pro posouzení vlivu kalibrace LA, BA a vyrovnání pásů byla použita data přístroje RIEGL miniVUX-1UAV. Let byl proveden přibližně ve výšce 50 metrů nad bodem vzletu. Skenování bylo provedeno v 5 podélných a 5 příčných pásích (obr. 3.3).



Obrázek 3.3: Trajektorie a názvy naskenovaných pásů Horní Vidim. Výrazně označeny použité pásy. (zdroj: CloudCompare)

Celé bodové mračno obsahuje 35 632 196 bodů. Omezení zobrazení bodů úhlu skenování bylo nastaveno na 40 °. Rozdělení na dílčí pásy bylo provedeno softwarově při předzpracování bodového mračna.

Výsledkem měření bylo naskenování pěti příčných a pěti podélných pásů. V názvu jednotlivých souborů je uveden čas počátku skenování ve formátu (RR/MM/DD_HH:MM:SS).

Příčné pásy:

- 191015_122844
- 191015_123005
- 191015_123131

- 191015_123252
- 191015_123410

Podélné pásy:

- 191015_123531
- 191015_123651
- 191015_123815
- 191015_123938
- 191015_124104

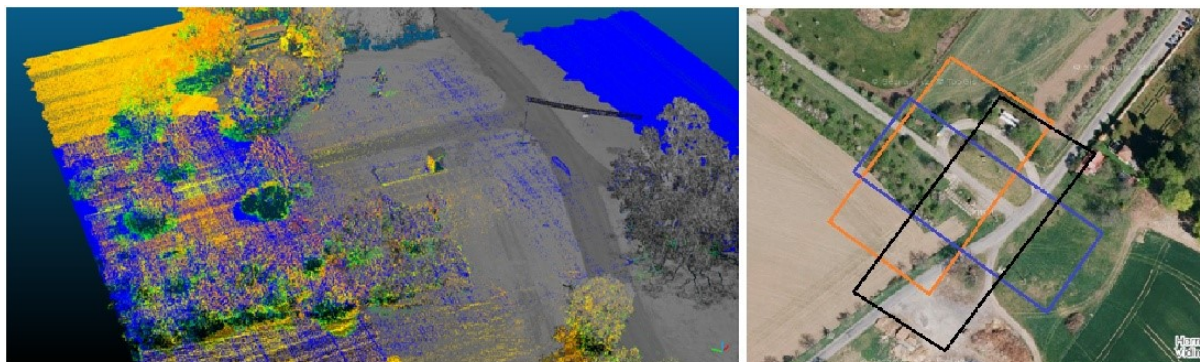
Pro praktickou část byly speciálně vybrány tři naskenované pásy (obr. 3.4, trajektorie označena na obr. 3.3). Tyto tři naskenované pásy byly vybrány z důvodu blízkého letu u objektu trafostanice. Důvodem vybrání tří pásů, jež dva jsou rovnoběžné a třetí je na ně kolmý, je taktéž i kontrola metodiky průběhu letu, kdy se předpokládá zlepšení přesnosti výsledného bodového mračka při skenování v různých směrech letu (viz úvod).

Dva pásy představují dva na sebe kolmé pásy. Označíme je jako „kom. 1“.

- 191015_123815
- 191015_123131

A jeden předchozí pás (191015_123815) použijeme jako kombinaci s třetím vybraným pásem. Bude se jednat o dva překrývající se pásy. Označíme je jako „kom. 2“.

- 191015_123815
- 191015_123938



Obrázek 3.4: Originální naskenované pásy Horní Vidim – barevné označení použitých pásů (modrá – 191015_123131; šedá – 191015_123815; oranžová – 191015_123938)

3.2.3 Použitá data pro validaci

Pro zaměření kontrolních bodů byl použit GNSS přijímač Trimble R10. Pro měření bodů byla využita rychlá statická metoda s VRS (dle normy ČUZK). Při měření GNSS přijímačem byla exportována data v textovém formátu a konfiguraci X, Y, Z v systému JTSK (obr. 3.5).



Obrázek 3.5: Foto experimentální oblasti Horní Vidim. Vlčovací body. nahoře – zaměřený patník; vlevo dole – terč; vpravo dole – koule; vpravo – rozmístění bodů

Pro potřeby výpočtu reziduí na kontrolních bodech bylo vybráno pět bodů na terčích. Tyto body byly vybrány s ohledem na dvě kombinace příčných a podélných pásů. (tab. 3.2).

Číslo bodu	Y [m]	X [m]	Z [m]
5	729832.505	1002372.140	396.713
6	729817.522	1002363.325	397.383
11	729806.571	1002361.954	398.017
12	729834.194	1002344.869	397.488
13	729849.188	1002335.021	397.680

Tabulka 3.2: Souřadnice kontrolních bodů – Horní Vidim

3.3 Oblast Dlouhá Ves

3.3.1 Charakteristika zájmového území

Jako druhá experimentální oblast byla vybrána obec Dlouhá Ves v okrese Klatovy. Pro potřebu skenování byl vybrán střed obce (obr. 3.6). V naskenované oblasti se nachází nízká zástavba. Dominantní stavbou této oblasti je základní a mateřská škola a kostel svatých Filipa a Jakuba. Dále se zde nacházejí obytné domy, asfaltové cesty, zahrady, louky, místní rybník, vedení nízkého napětí a případně vysoké stromy a jiná vegetace. Můžeme tedy tuto oblast označit za intravilán.

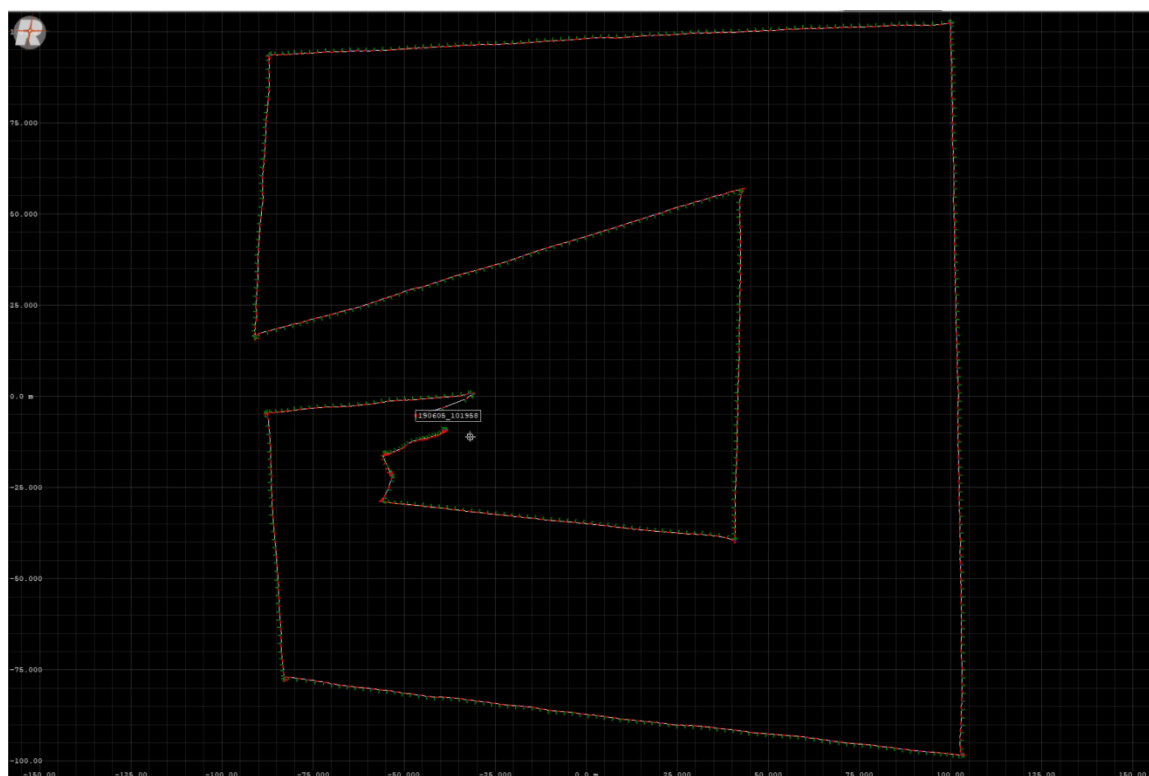
Elsner (2018) nebo Chan (2021) oblast intravilánu doporučují kvůli hledání společných ploch slícování. Především se pak využívají střechy stavebních objektů, které zaručují lepší slícování dat a tím i kalibraci BA a LA, případně metodu SA.



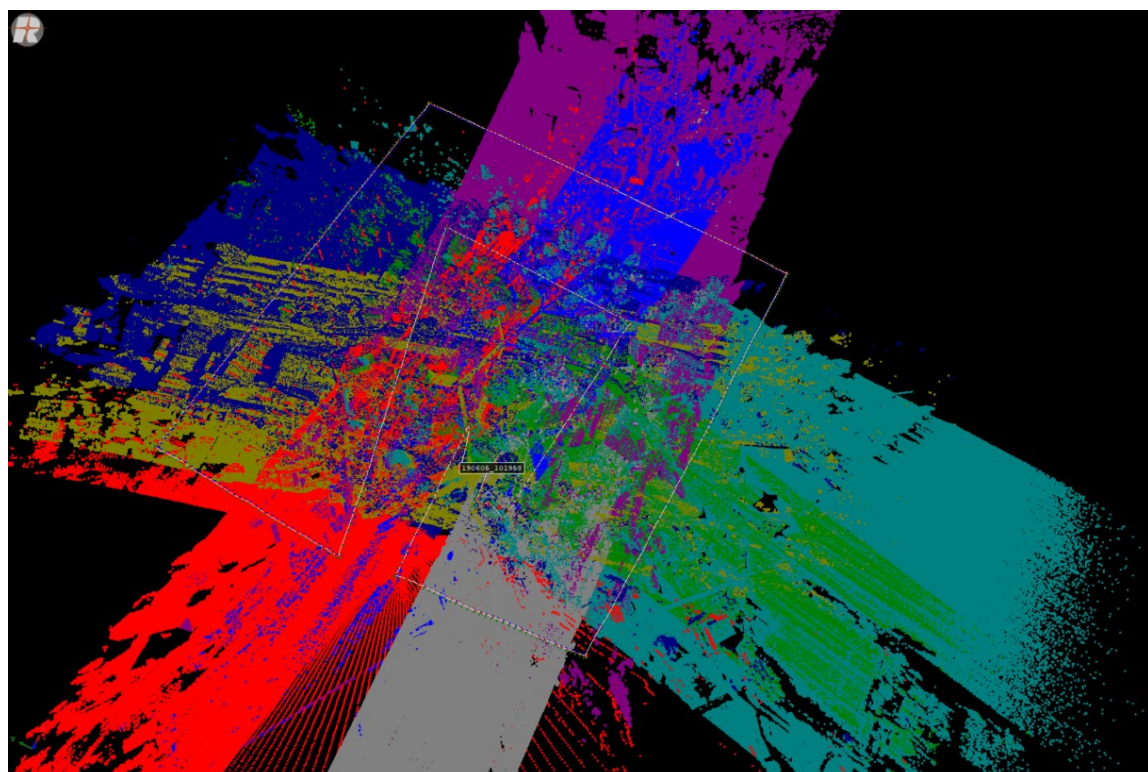
Obrázek 3.6: Experimentální oblast Dlouhá Ves – ortofoto (zdroj: Mapy.cz)

3.3.2 Použitá data UAV

V experimentální oblasti Dlouhá Ves byl let koncipován jinak než v případě prvním. Neskenovalo se pomocí příčných či podélných pásů. Naopak skenovalo se pásy nad oblastí zájmu (viz obr. 3.7). Celé bodové mračno obsahuje 22 025 793 bodů, je tedy naskenovaná větší oblast než v případě Horní Vidimi. Proto je zde i menší hustota bodů. Omezení zobrazení bodů úhlu skenování bylo nastaveno stejně jako v předchozím případě na 40 °.



Obrázek 3.7: Trajektorie UAV – Dlouhá Ves. (zdroj: RiProcess)



Obrázek 3.8: Originální naskenované pásy Dlouhá Ves – barevné označení použitých pásů (zdroj: RiProcess)

Bylo naskenováno těchto 8 pásů (viz obr. 3.8):

- 190605_111338
- 190605_111414
- 190605_111543
- 190605_111718
- 190605_111847
- 190605_111926
- 190605_112033
- 190605_112120

3.3.3 Použitá data pro validaci

Na rozdíl od experimentální oblasti Horní Vidim bylo použito pro zjištění vlivu kalibrací a SA měření všech pásů. Nebylo tudíž třeba kontrolovat, v jakém pásu se kontrolní body nacházejí (obr. 3.9).



Obrázek 3.9: Dlouhá Ves – rozmístění kontrolních bodů

Pro výpočet reziduí jednotlivých kombinací bodových mračen bylo zvoleno pět bodů (tab. 3.3), jež jsou rovnoměrně rozmístěny po celé ploše skenované oblasti. Byly vybrány body 18, 20, 22, 32 a 38. Všechny tyto body se nacházejí na kraji hřebenu vybraných střech obytných domů. Body byly změřeny technologií RTK-GNSS v rámci projektu pilotního ověření využití bezpilotních leteckých systémů při obnově katastrálního operátu zpracovaného Katastrálním úřadem pro Plzeňský kraj.

Číslo bodu	Y [m]	X [m]	Z [m]
18	821739.31	1131909.92	526.19
20	821830.98	1131839.04	526.69
22	821943.14	1131829.66	530.54
32	821826.26	1131932.04	532.64
38	821777.93	1131795.49	519.82

Tabulka 3.3: Souřadnice kontrolních bodů – Dlouhá Ves

4. Metodika

4.1 Výběr metodiky

Na základě znalostí problematiky a provedené rešerše jsem zvolil jako cíl této práce zjištění vlivu kalibrací LA, BA a vlivu metody SA. Ačkoli Habib (2008) i ostatní autoři metodu vyrovnání pásů využívají místo LA a BA kalibrace, zároveň uvádějí v hodnocení, že výsledná přesnost naskenovaného mračna v případě vyrovnání pásů je stejná, respektive podobná jako v případě BA kalibrace, protože se obě metody počítají pomocí metody nejmenších čtverců. Přesto je mezi nimi značný rozdíl. LA a BA kalibrace zjišťují rozdíly, respektive paralelní usazení snímačů IMU/GNSS a LiDARu, a jejich oprava je tak vztažena k centru promítání (k LiDARu). Proto jsou hodnoty kalibrace vztaženy k celému souboru měření, respektive k jeho centru. Naopak SA je vztaženo na jednotlivé naskenované pásy. Pro každý jednotlivý pás je vypočítán posun a rotace. Každý jednotlivý pás je tedy posunut, respektive rotován do polohy, v níž vznikne největší možné slícování pásů (Wang a kol. 2010; Bakule a kol. 2016; Li a kol. 2017).

Co však není zřejmé, je vliv těchto dvou metod (kalibrace LA, BA a SA) na výslednou přesnost. Stocker (2017), Cucci (2017) i Chan (2021) například tvrdí, že nehledě na BA a LA kalibraci nebo vyrovnání pásů velmi ovlivňuje výslednou přesnost tzv. křížový let. Pokud je takto let koncipován, zlepši se výsledná přesnost nehledě na post-processing. Problém křížových letů je však v čase, který musí UAV letět. Jedná-li se o velké území a není kapacita pro provedení křížových letů, Cucci (2017) uvádí, že je vhodné v polovině skenovaného území provést alespoň jeden příčný let. Tento způsob koncipování letu je vhodný především pro velmi přesné práce. Pokud jsou pásy naskenované v jednom směru s určitým překrytím naskenovaných oblastí, je možné nalézt více ploch slícování („*tie points*“), a tudíž je možné provést lepší SA vyrovnání. Wang (2010) ovšem poukazuje na to, že při větším úhlu skenování jsou body změřené z většího úhlu a jejich přesnost tím klesá. Naopak doporučuje hledat plochy slícování pouze pod určitým úhlem skenování. Tím se zaručí plochy, které jsou kvalitněji naskenované a jsou lepší pro následný výpočet MNČ.

Nehledě na vybranou metodu, tedy buď kalibraci LA a BA nebo SA, se tímto post-processingem snažíme najít největší geometrickou korelaci mezi naskenovanými daty. Kalibrace LA a BA, případně vyrovnání pásů výrazně zmenší odchylky na vybraných plochách mezi jednotlivými pásy měření. Nesníží však například zachycená auta, chodce nebo

chybné odrazy laserového skeneru. Samostatnou kapitolou úpravy dat jsou přírodní objekty, především pak naskenovaná vegetace. Zde bude stále prostor pro filtraci nebo klasifikaci bodového mračna (uvádí např. Hyypä a kol. 2020). Metoda SA v případě kalibrací LA a BA však cílí především na geometrickou přesnost. Skaloud (2008) se zabývá problematikou absolutní přesnosti v rámci georeferenčních polohových národních systémů, která ovšem nezáleží na provedených LA nebo BA kalibracích nebo jiných redukcích geometrické nepřesnosti, ale závisí hlavně na přímém georeferencování při výpočtu trajektorie IMU/GNSS modulu.

Při výpočtech BA kalibrací nebo SA vyrovnaní je velmi důležitou částí zohlednění parametrů slícování ploch („*tie points*“). Autoři (např. Gressin a kol. 2012; Li a kol. 2016; Li a kol. 2017 nebo Moon a kol. 2019) se neshodují v tom, jaké se mají nastavit parametry, ale zmiňují, že je vhodné zohlednit charakter skenovaného území. Ve velmi hustě zastavěném území je vhodné zvolit velkou úhlovou toleranci, kvůli velkému počtu střech se zde najde více ploch pro slícování. Naopak v rovinatém území je vhodné nastavit menší úhlovou toleranci. Pro členité území je vhodné zvolit menší velikost plochy pro slícování a například pro plochu porostlou vyšší vegetací je vhodné zvolit větší vzdálenost normály dvou ploch. Výsledkem je poté počet ploch, které se slícují, počet neznámých parametrů, případně počet stupňů volnosti. Po provedení slícování ploch je vypočtena směrodatná odchylka. Je možné také analogicky zvolit metodu slícování plocha a bod, nebo bod a bod. (Habib a kol. 2008; Rieger a kol. 2008; Wang a kol. 2010).

Validaci výsledků provádí každý autor jinak. Zatímco většina se přiklání k použití kontrolních bodů (Skaloud a kol. 2006; Wang a kol. 2010; Persad a kol. 2015 nebo Elsner a kol. 2018), někteří porovnávají dvě bodová mračna získaná různými metodami (Koska a kol. 2017; Tu a kol. 2018). Také je možné porovnávat příčné nebo podélné řezy slícovaného bodového mračna (Habib a kol. 2008) nebo v případě geovědních oborů výsledná DMT získaná dvěma metodami (Gruen a kol. 2005). Co se týče větších naskenovaných oblastí, vyberou se objekty (například stavební), u kterých je možné provést porovnání nebo řezy (Li a kol. 2017).

Z výše uvedeného bylo sestaveno následující schéma postupu prací:

- zpracování trajektorie letu a výpočet přímé georeference (*POSPAC UAV*),
- výpočet bodového mračna z trajektorie dráhy letu UAV (*RiProcess*),

- rozdělení bodového mračka na naskenované pásy a omezení úhlu naskenovaných dat (*RiProcess*),
- vhodný výběr naskenovaných pásů vzhledem ke sledovaným objektům,
- výběr vhodných ploch slícování vzhledem k charakteru naskenovaného území (*RiProcess*),
- výpočet přesnosti slícování ploch při provedení různých kombinací - LA a BA kalibrace a SA (*RiProcess*),
- statistické hodnocení provedených kombinací pomocí histogramu četností přesnosti slícování ploch a
- provedení validace výsledků – rezidua upravených a neupravených bodových mračen, rezidua na kontrolních bodech apod. (*RiProcess* nebo *CloudCompare*).

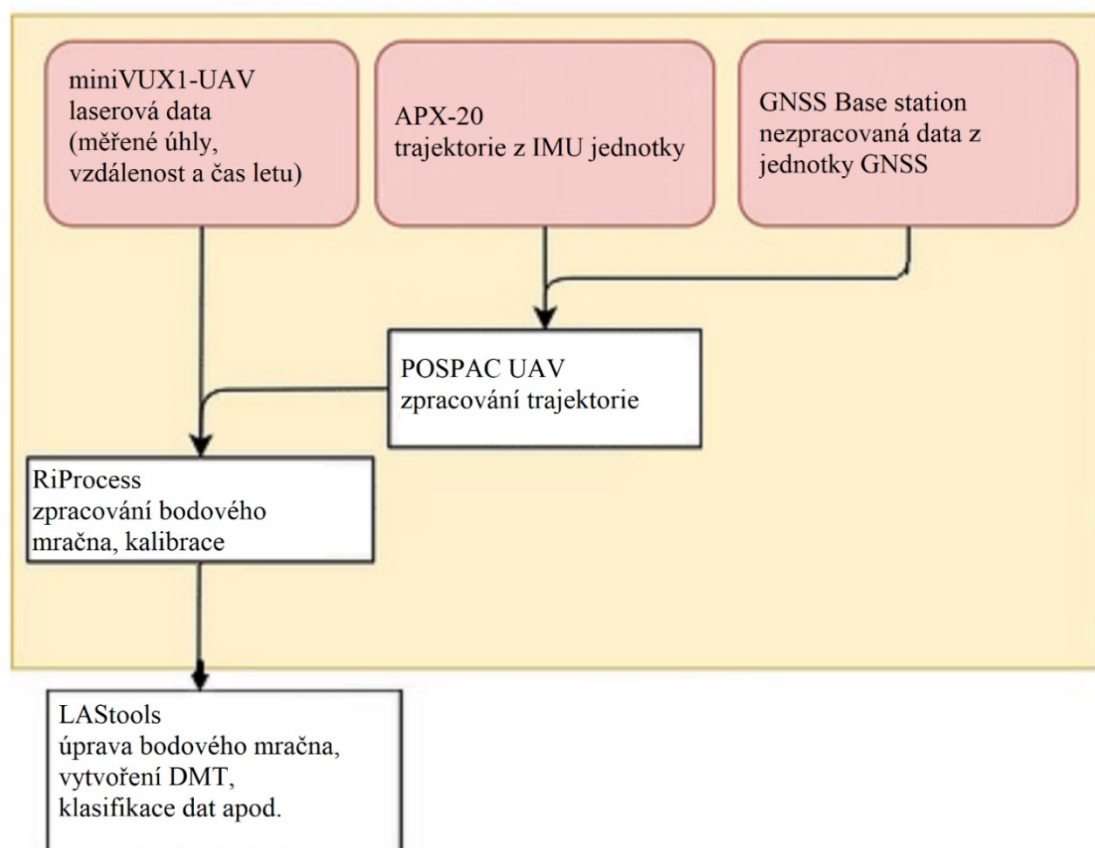
Pro zjišťování vlivů LA, BA kalibrace a SA byly nejprve definovány následující kombinace metod, jejich výsledky budou následně analyzovány:

- nezpracované bodové mračno,
- použití LA a BA kalibrace,
- použití LA kalibrace,
- použití BA kalibrace,
- použití SA,
- použití SA pouze posun,
- použití SA pouze rotace
- použití LA a BA kalibrace a SA.

4.2 Zpracování dat

4.2.1 Předzpracování – georeferencování trajektorie UAV

Data UAV je potřeba upravit a předzpracovat pro potřebnou analýzu. Zpracování měření UAV je složeno z několika kroků, které jsou na sobě částečně závislé (obr. 4.1).



Obrázek 4.1: Proces zpracování dat z UAV (upraveno Harder a kol. 2019)

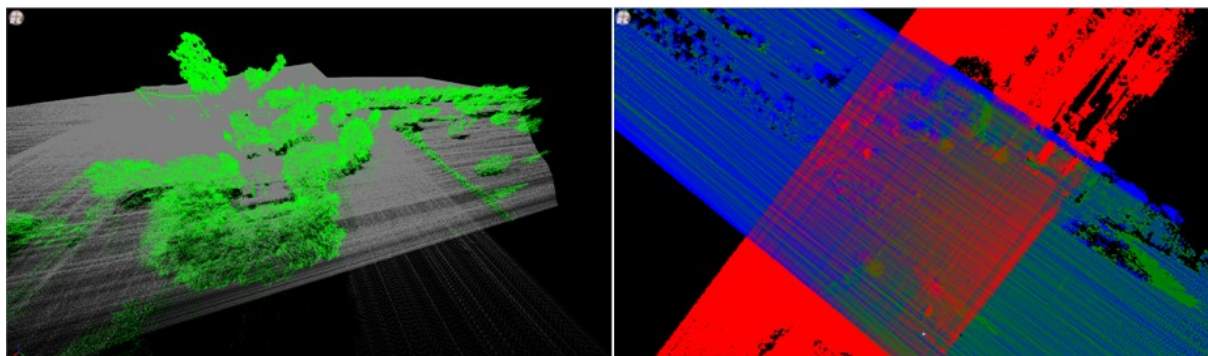
Primárně je potřeba zinicilizovat, georeferencovat trajektorii letu UAV. Tento proces probíhal v programu *POSPac*. Výsledkem je dopočítaná dráha letu UAV (obr. 4.2). V rámci procesu je možné transformovat trajektorii letu do vybraných polohových a výškových referenčních systémů. Výsledná trajektorie tak byla v polohovém systému ETRS89, který je softwarem *RiProcess* doporučován.

1	2	3	4	5	6	7
coord. X	coord. Y	coord. Z	Scalar	Scalar	Scalar	Scalar
Easting[m]	Northing[m]	Height[m]	Pitch[deg]	Roll[deg]	Yaw[deg]	Time[s]
466169.292	5590520.328	431.545	-3.161777983239	1.016759213286	126.930471422214	255177909.145074
466169.300	5590520.322	431.545	-3.160247264530	1.023679592789	126.945389201535	255177909.150075

Obrázek 4.2: Horní Vidim - údaje trajektorie UAV – x, y, z, ϕ , ω , κ , geodetické datum (zdroj: CloudCompare)

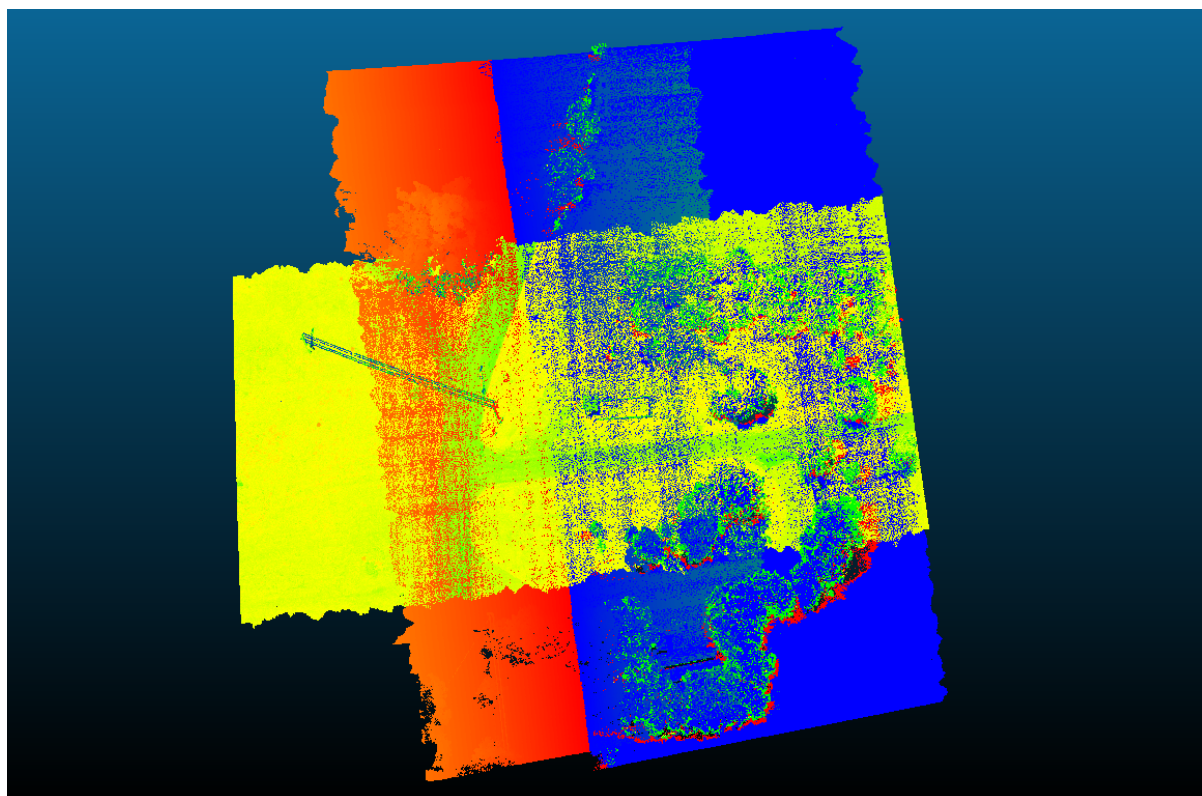
4.2.2 Zpracování dat UAV

Po výpočtu trajektorie letu byla v programu *RiPROCESS* vypočtena bodová mračna z údajů laserového skeneru. Současně byla bodová mračna rozdělena na jednotlivé pásy. Následně proběhla vizualizace bodových mračen (obr. 4.3).



Obrázek 4.3: Bodové mračno Horní Vidim - vlevo – 3D pohled na vybrané naskenované pásy; vpravo – 2D pohled (vybrané pásy – červená, modrá, zelená) (zdroj: upraveno RiProcess)

Pro lepší zobrazení bodového mračna je vhodné provést základní klasifikaci objektů. Terén je proto vhodné odlišit od vegetace a vyšších objektů. Taktéž v rámci výpočtu kalibrací nebo vyrovnání pásů je nutné omezit úhel nasnímaných bodů (obr. 4.4).



Obrázek 4.4: Bodové mračno Horní Vidim - úhlové omezení pásů a jejich vzájemná poloha – vybrané tři pásy (zdroj: CloudCompare)

Po těchto nezbytných výše uvedených úpravách a zpracování bodových mračen byly provedeny dva kroky. Byly vypočítané BA a LA kalibrace a následně bylo vypočteno SA na všechny použité pásy. V následujícím obrázku (obr. 4.5) je ukázka vypočtených redukcí obou testovacích oblastí při SA pro všechny pásy (označeno „*laser data*“). V dolní části jsou vždy poté vypočítané LA a BA kalibrace (označeno „*laser devices*“).

Object	Record												
Laser data			Roll		Pitch		Yaw		East	North	Height		
190605_111338_...	190605_1113...		-0.011		-0.093		0.018		0.005		0.037		0.017
190605_111414_...	190605_1114...		0.007		0.694		-0.003		-0.328		-0.096		-0.025
190605_111543_...	190605_1115...		0.070		0.044		0.166		0.060		-0.127		-0.130
190605_111718_...	190605_1117...		0.070		-0.441		0.087		-0.232		-0.102		-0.128
190605_111847_...	190605_1118...		0.086		0.001		-0.012		0.056		-0.005		0.039
190605_111926_...	190605_1119...		-0.005		-0.521		-0.556		0.287		-0.118		0.109
190605_112033_...	190605_1120...		0.024		0.427		-0.253		0.013		0.157		0.074
190605_112120_...	190605_1121...		0.045		0.094		0.090		0.088		-0.134		0.049
Laser devices			Roll		Pitch		Yaw		X	Y	Z		
Scanner 1			0.15216		-0.063...		0.25719		0.165		-0.025		0.049

Object	Record												
Laser data			Roll		Pitch		Yaw		East	North	Height		
191015_122844_...	Record001_c...		-0.042		1.011		-0.051		-0.496		0.274		0.082
191015_123005_...	Record001_c...		-0.019		-0.147		-0.295		-0.034		-0.115		-0.006
191015_123131_...	Record001_c...		-0.023		-0.801		-0.378		0.295		-0.284		-0.020
191015_123252_...	Record001_c...		0.000		0.159		-0.292		-0.186		-0.021		-0.020
191015_123410_...	Record001_c...		-0.067		-0.202		-0.016		-0.333		-0.173		0.022
191015_123531_...	Record001_c...		-0.070		0.580		0.057		0.852		0.629		0.004
191015_123651_...	Record001_c...		-0.008		-1.207		0.271		0.213		0.431		-0.030
191015_123815_...	Record001_c...		-0.027		-0.058		0.086		-0.083		-0.067		-0.006
191015_123938_...	Record001_c...		-0.029		-0.260		0.128		0.017		0.048		-0.001
191015_124104_...	Record001_c...		-0.033		-0.196		0.032		-0.087		-0.055		-0.003
Laser devices			Roll		Pitch		Yaw		X	Y	Z		
Scanner 1			0.19064		-0.172...		0.46304		0.179		0.001		-0.005

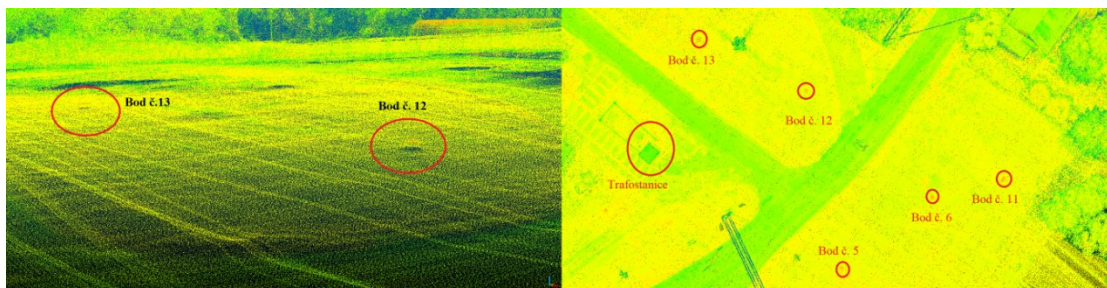
Obrázek 4.5: Kalibrace a vyrovnaní pásů – nahoře oblast Dlouhá Ves, dole oblast Horní Vidim (zdroj: upraveno RiPROCESS)

Při výpočtu SA nebo BA kalibrace je důležité hledání ploch slícování. Pro naši potřebu bylo vyzkoušeno několik kombinací pro hledání „*tie points*“ v závislosti na skenovaném území. Následně je možné provést porovnání přesností kombinací LA a BA kalibrací a metody SA.

4.2.3 Zpracování dat pro validaci

Validace výsledků byla provedena několika způsoby. Prvním způsobem bylo porovnání výškových reziduí nezpracovaného bodového mračna a zpracovaného bodového mračna. Tento způsob byl zobrazen pomocí softwaru CloudCompare. Další metodou použitou pro

validaci dat je výpočet reziduí jednotlivých kombinací upravených bodových mračen na kontrolních bodech (obr. 4.6).



Obrázek 4.6: Horní Vidim - zobrazení kontrolních bodů v bodovém mračnu (zdroj: CloudCompare)

Tato metoda ovšem vyžaduje převod bodového mračna do systému JTSK. Pro převod různých kombinací bodového mračna byl použit výpočetní modul programu ETJ TZU, který je schválený ČUZK. Tento program převádí souřadnice ETRS89 do S-JTSK pomocí zpřesněné globální transformace (více na stránkách ČUZK). Rezidua byla vypočtena pomocí softwaru Infinity.

5. Výsledky

Tato kapitola obsahuje výsledky provedených výzkumů, jež jsou popsány v předchozí kapitole. Výsledky jsou rozděleny na dvě sledované oblasti a pro větší přehlednost do několika podkapitol. Sledované oblasti jsou pro zjednodušení značeny O1 (oblast Horní Vidim) a O2 (oblast Dlouhá Ves).

První část výsledků je popis nastavení parametrů hledání společných ploch slícování („*tie points*“). Tyto parametry byly použity pro následující kapitoly. Dále jsou představeny statistické analýzy jednotlivých kombinací, pomocí kterých jsou vždy popsány. Součástí výsledků kombinací jsou provedené validace dat.

5.1 Oblast Horní Vidim

5.1.1 Parametry hledání společných ploch slícování

Nehledě na LA a BA kalibraci je pro potřeby SA nutné nalézt nejvhodnější parametry slícování. Primárními parametry, které je třeba získat, jsou: hledání bodů v poloze, maximální úhlová tolerance a maximální vzdálenost normály dvou hledaných ploch. Jedním z výsledků hledání ploch slícování je vlastní počet ploch. Tento parametr však není směrodatný. Více ploch slícování nemusí znamenat výsledné lepší vyrovnaní pásů. Při hledání ploch slícování nám výslednou přesnost udává především výsledná směrodatná odchylka vyrovnaní. Pro potřeby nalezení parametrů hledání společných ploch slícování využijeme předpokladu, že pro následnou analýzu si vybereme pouze určité vybrané pásy. Ostatní pásy, které v následné analýze neuvažujeme, mohou být topograficky odlišné. Jako příklad lze uvést právě okraj obce, kde část naskenovaných dat je nad zástavbou a část nad odkrytým terénem. V tomto případě by parametry slícování ploch nemusely být zcela validní. Pokud by se hledaly plochy charakteristické pro zástavbu, neodpovídaly by části, kde se nachází volné prostranství.

Pro naši primární potřebu využijeme základní nastavení hledání ploch. To je 0.1 metru hledání bodů ploch v poloze, úhlovou toleranci o 1° a 0.02 metru maximální vzdálenost normály. Pro všechny tyto parametry budeme měnit základní parametry. Pro hledání bodů v poloze zvětšíme a snížíme plochu hledání na parametry 0.05, 0.3 a 0.5 metru. U úhlové tolerance budeme uvažovat 1° , 20° a 45° a pro maximální vzdálenost normály dvou ploch

budeme uvažovat vzdálenosti 0.01, 0.02, 0.1 a 0.3 metru. V následující tabulce jsou uvedeny výsledky těchto srovnání.

Hledání bodů v poloze [m]	Úhlová tolerance [°]	Maximální vzdálenost normály [m]	Nalezených ploch	Směrodatná odchylka [m]
0.1	1	0.02	245	0.009
0.3	1	0.02	761	0.009
0.5	1	0.02	938	0.010
0.1	20	0.02	328	0.009
0.3	20	0.02	1007	0.010
0.5	20	0.02	1264	0.010
0.1	45	0.02	328	0.010
0.3	45	0.02	1008	0.010
0.5	45	0.02	1264	0.010
0.1	1	0.1	329	0.028
0.3	1	0.1	1089	0.027
0.5	1	0.1	1368	0.029
0.1	1	0.3	329	0.031
0.3	1	0.3	1094	0.030
0.5	1	0.3	1389	0.028
0.1	1	0.01	159	0.008
0.3	1	0.01	461	0.005
0.5	1	0.01	562	0.005
0.05	1	0.02	35	málo observací pro výpočet

Tabulka 5.1: Parametry hledání ploch slícování (O1)

Z výše zmíněného (tab. 5.1) lze pozorovat, že jsou zde patrné prahové hodnoty pro zvolení parametrů hledání ploch slícování, především pak zvolení příliš malé vzdálenosti hledání ploch v poloze. U hodnoty 0.05 metru bylo vytvořeno příliš málo ploch slícování. Proto nebylo možné vypočítat SA a tím pádem směrodatnou odchylku. Další prahovou hodnotu lze spatřit při zvolení maximální hodnoty normály dvou hledaných ploch, a to od 0.1 metru. Ačkoli se zvýšil počet nalezených ploch, celková směrodatná odchylka se zhoršila, nicméně o 0.03 metru, což není prokazatelná hodnota. Přesto ve srovnání s ostatními kombinacemi je výsledná směrodatná odchylka vyšší, a proto lze doporučit volbu hledání maximální vzdálenosti normály dvou hledaných ploch do 0.1 metru. V úhlové toleranci lze spatřit, že při zvolených hodnotách 20 °, respektive 45 ° neproběhl vyšší nárůst nalezených ploch. Je to dáno především charakterem území, kdy byl skenován hlavně čistý terén.

Pro další srovnání LA a BA kalibrací s SA tak lze využít primární nastavené hodnoty, a to 0.1 metru hledání ploch v poloze, 1° úhlovou toleranci a 0.02 metru maximální vzdálenosti normál dvou hledaných ploch. Pro následnou analýzu tedy využijeme tyto parametry:

Hledání bodů v poloze [m]	Úhlová tolerance [$^\circ$]	Maximální vzdálenost normály [m]
0.1	1	0.02

Tabulka 5.2: Použité parametry hledání ploch slícování (O1)

5.1.2 Kalibrace LA a BA

Po hledání parametrů společných ploch slícování lze uskutečnit s vybranými parametry kalibrace LA a BA.

Kombinace	Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
1	6	140	0.009
2	6	236	0.009

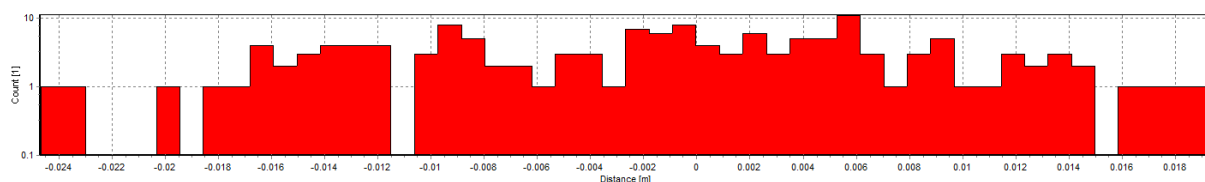
Tabulka 5.3: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA (O1)

Pro první kombinaci je menší počet observací, což je dané menším pokryvem naskenovaného území. Směrodatná odchylka je v tomto případě stejná (tab. 5.3).

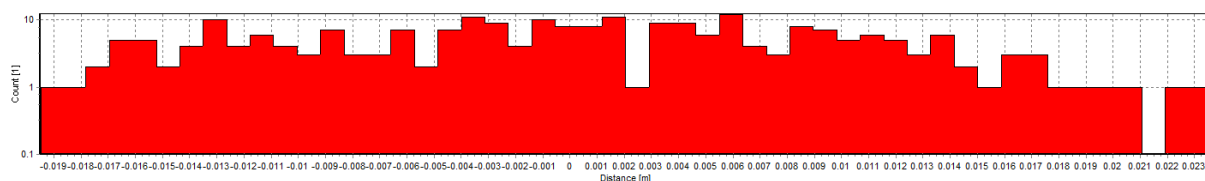
Kombinace	ω [$^\circ$]	φ [$^\circ$]	κ [$^\circ$]	x [m]	y [m]	z [m]
1	0.19124	-0.159290	0.40363	0.174	0.000	-0.006
2	0.20017	-0.148390	0.44165	0.160	-0.001	-0.007

Tabulka 5.4: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA (O1)

Hodnoty kalibrací LA (x, y, z) i BA (ω , φ , κ) jsou v obou kombinacích jiné, přesto změna BA je viditelně větší nežli u LA kalibrace. Především pak korekce y a z hodnoty je velmi malá (tab. 5.4).

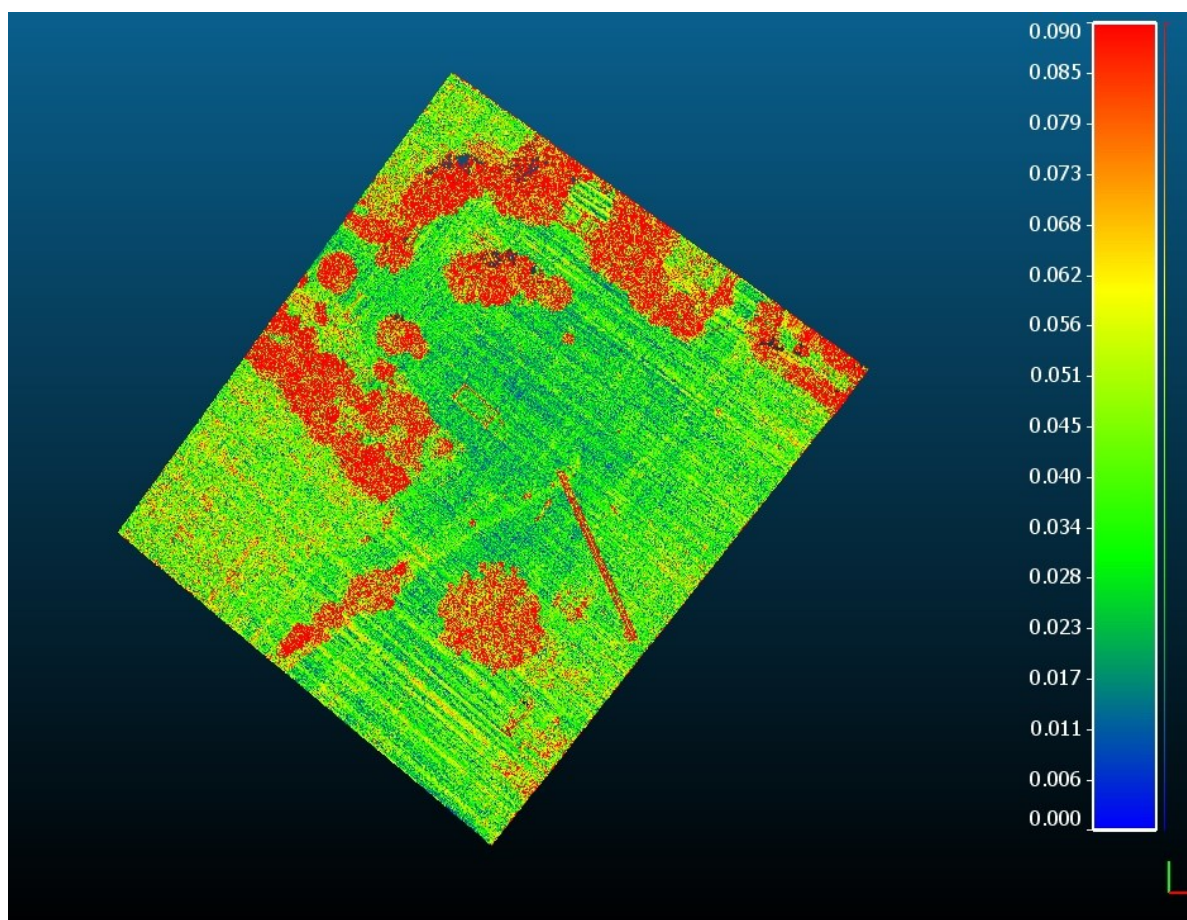


Graf 5.1: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA a BA - kombinace 1 (O1)

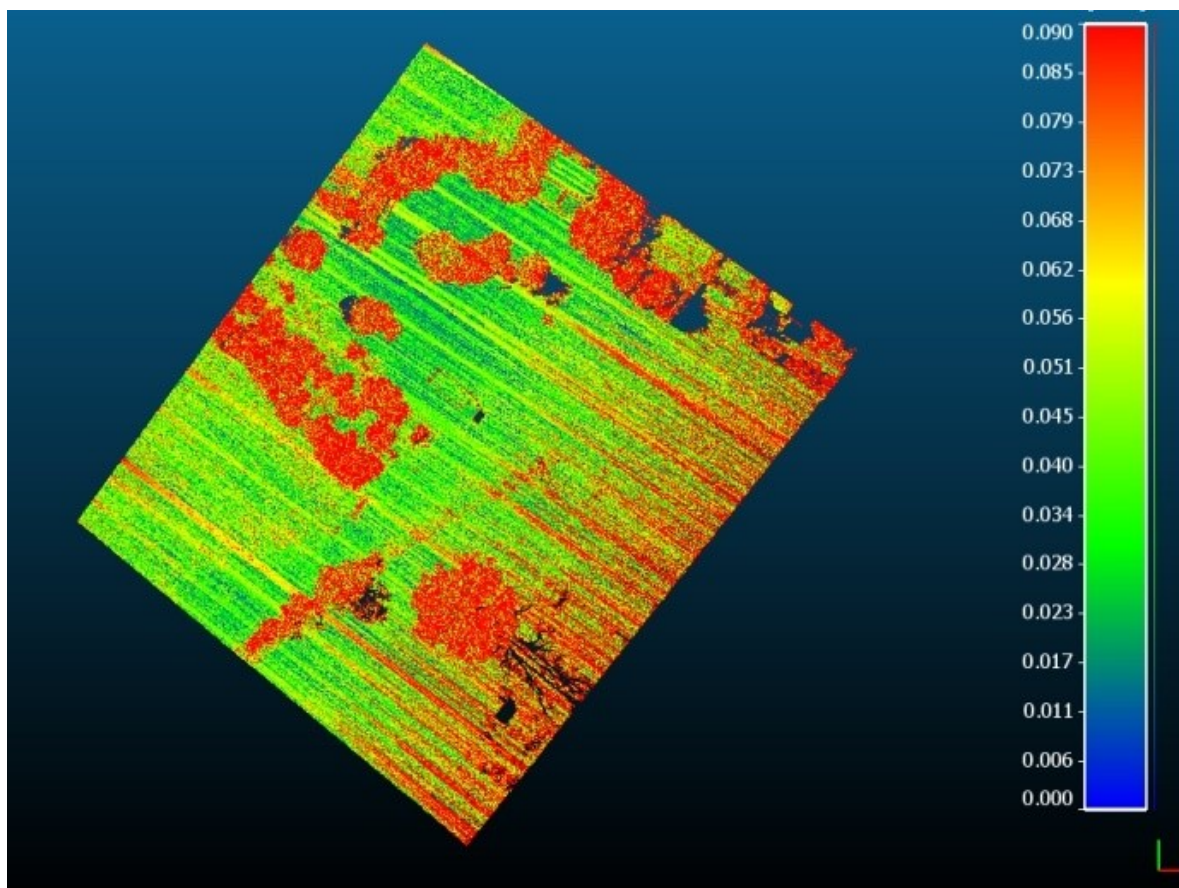


Graf 5.2: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA a BA - kombinace 2 (O1)

Při porovnávání grafu četností (graf 5.1 a graf 5.2) vzdálenosti jednotlivých vyrovnaných ploch podél normály lze vidět, že grafy jsou velmi podobné. U kombinace 2 lze spatřit více nalezených ploch slícování. U všech sledovaných veličin nejsou rozdíly mezi kombinací 1 a 2. Výsledná přesnost LA a BA kalibrace je 0.009 metru.



Obrázek 5.1: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a kalibrace LA a BA - kombinace 1 (O1)



Obrázek 5.2: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a kalibrace LA a BA - kombinace 2 (O1)

U výškových reziduí nekalibrovaného bodového mračka a bodového mračka, u kterého je provedena LA a BA kalibrace, je výrazný rozdíl mezi kombinací 1 (obr. 5.1) a kombinací 2 (obr. 5.2). Lze vidět u druhé kombinace vyšší výraznou změnu výšky na kraji zájmového území. Je to dané především tím, že je tato část naskenovaná pouze jedním pásem a je zde tedy větší vliv provedení kalibrace.

5.1.3 Kalibrace LA

Jako další kombinace je zvolena pouze kalibrace LA.

Kombinace	Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
1	3	140	0.011
2	3	236	0.010

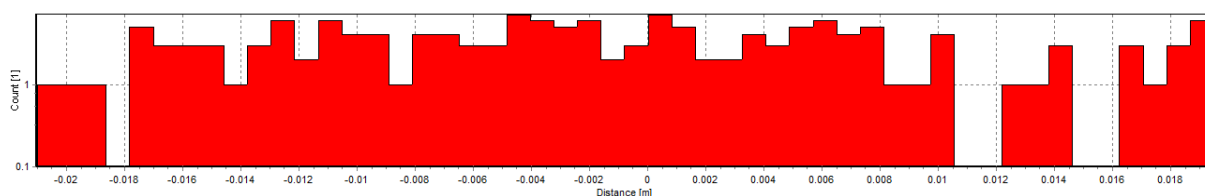
Tabulka 5.5: Výsledky výpočtu – kalibrace LA (O1)

Směrodatná odchylka je u obou kombinací stejná (tab. 5.5).

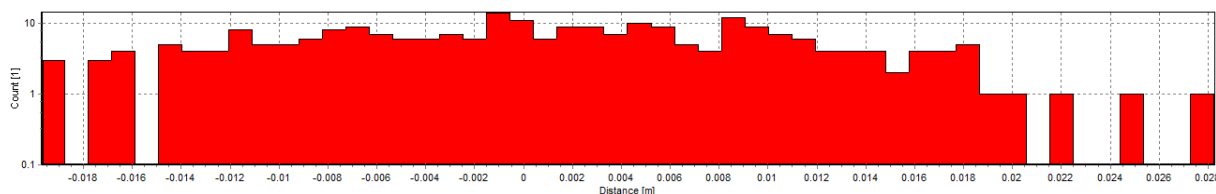
Kombinace	x [m]	y [m]	z [m]
1	0.203	-0.045	0.155
2	0.193	-0.004	-0.085

Tabulka 5.6: Hodnoty LA kalibrací – kalibrace LA (O1)

V případě kalibrací LA lze spatřit, že pokud do modelu vyrovnání neuvažujeme chybu paralelního usazení snímačů (tudiž BA kalibraci), je zde velký vliv opravy LA kalibrace u osy z. Navíc je zde velký rozdíl mezi jednotlivými kombinacemi, kdy rozdíl mezi posuny po ose z je až 0.23 metru (tab. 5.5).

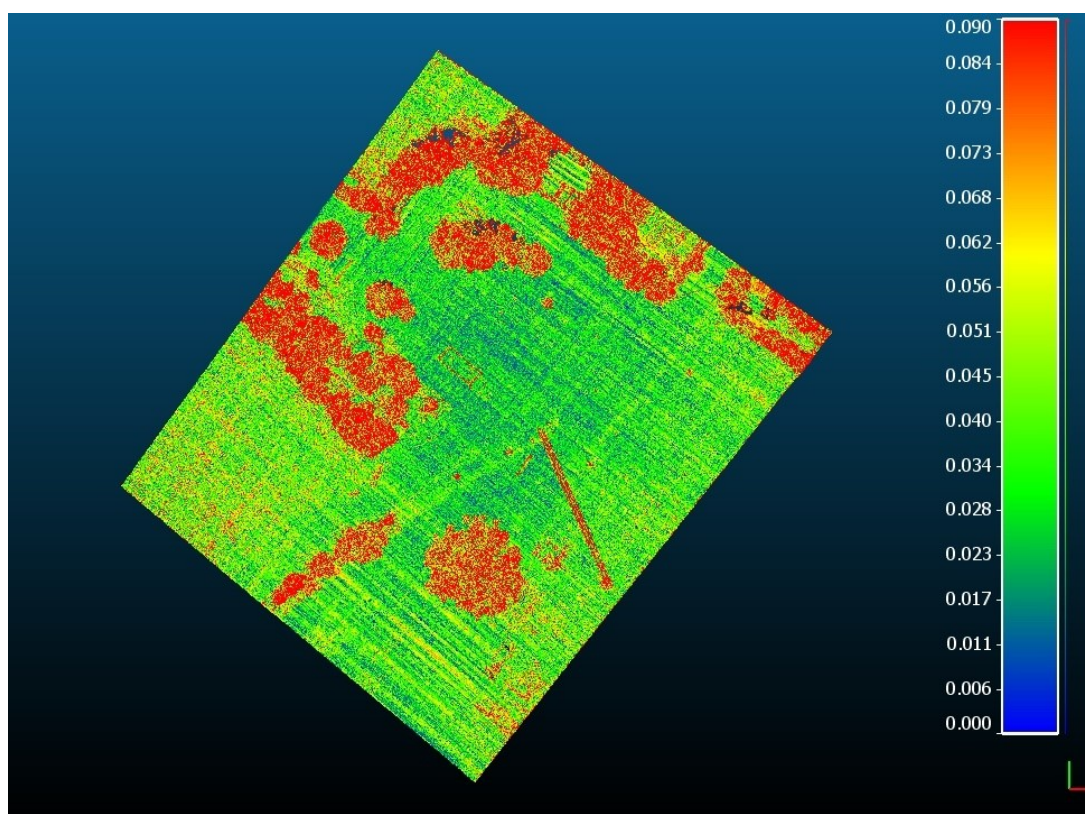


Graf 5.3: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA - kombinace 1 (O1)

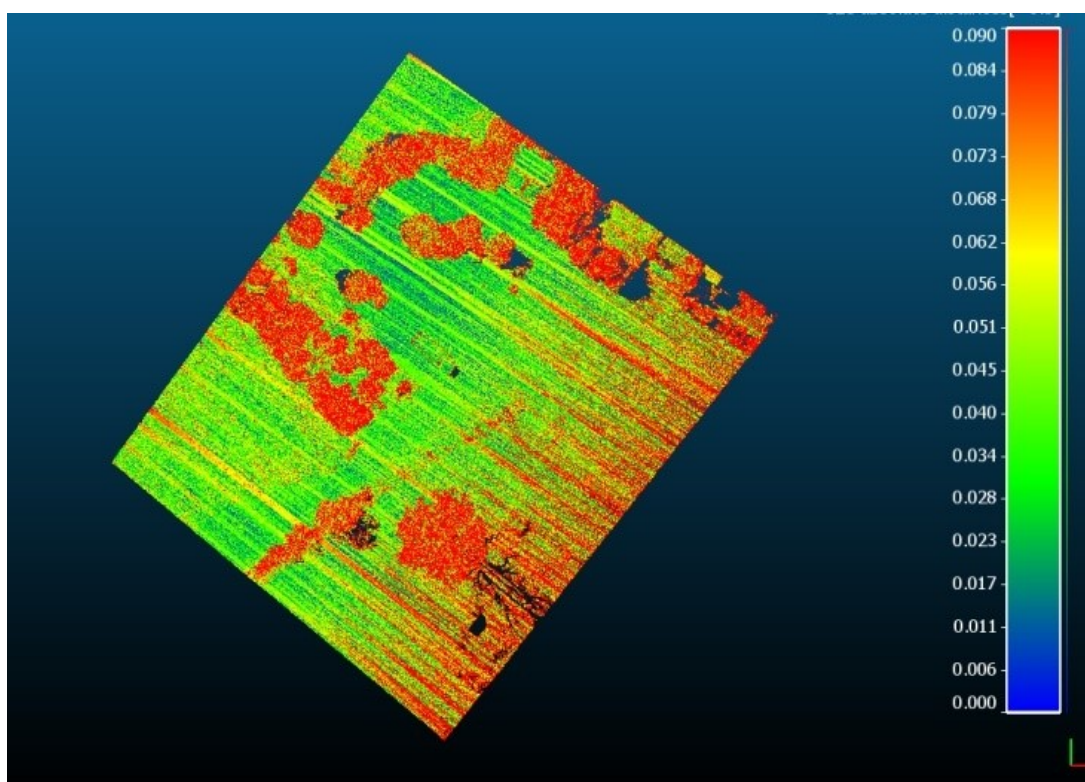


Graf 5.4: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA - kombinace 2 (O1)

U histogramu četností (graf 5.3 a graf 5.4) lze spatřit zvláštní jev. U druhé kombinace se po provedení kalibrace LA některé plochy posunuly až za okrajovou hodnotu 0.02 metru na 0.03 metru vzdálenosti podle normály. U provedení reziduí (obr. 5.3 a obr. 5.4) je výsledek téměř totožný s provedením kalibrace BA a LA.



Obrázek 5.3: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a kalibrace LA - kombinace 1 (O1)



Obrázek 5.4: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a kalibrace LA - kombinace 2 (O1)

5.1.4 Kalibrace BA

Po provedení pouze kalibrace LA následuje pouze kalibrace BA.

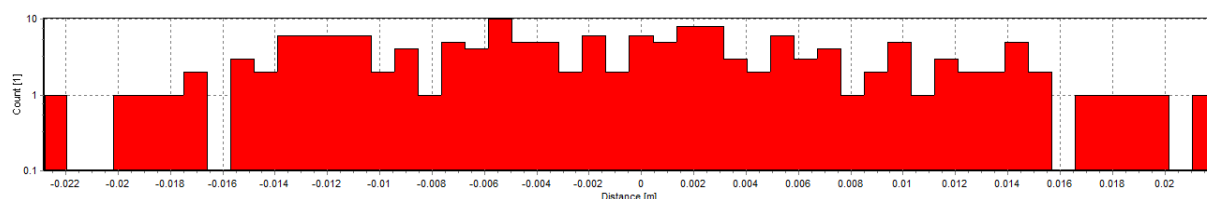
Kombinace	Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
1	3	140	0.010
2	3	236	0.010

Tabulka 5.7: Výsledky výpočtu – kalibrace BA (O1)

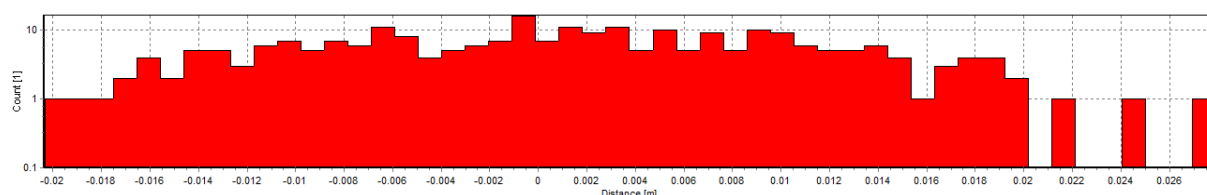
V případě provedení kalibrace BA jsou výsledky totožné s výsledky provedením kalibrace LA (tab. 5.7).

Kombinace	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]
1	0.19062	-0.17608	0.47307
2	0.20017	-0.148390	0.44165

Tabulka 5.8: Hodnoty BA kalibrací – kalibrace BA (O1)

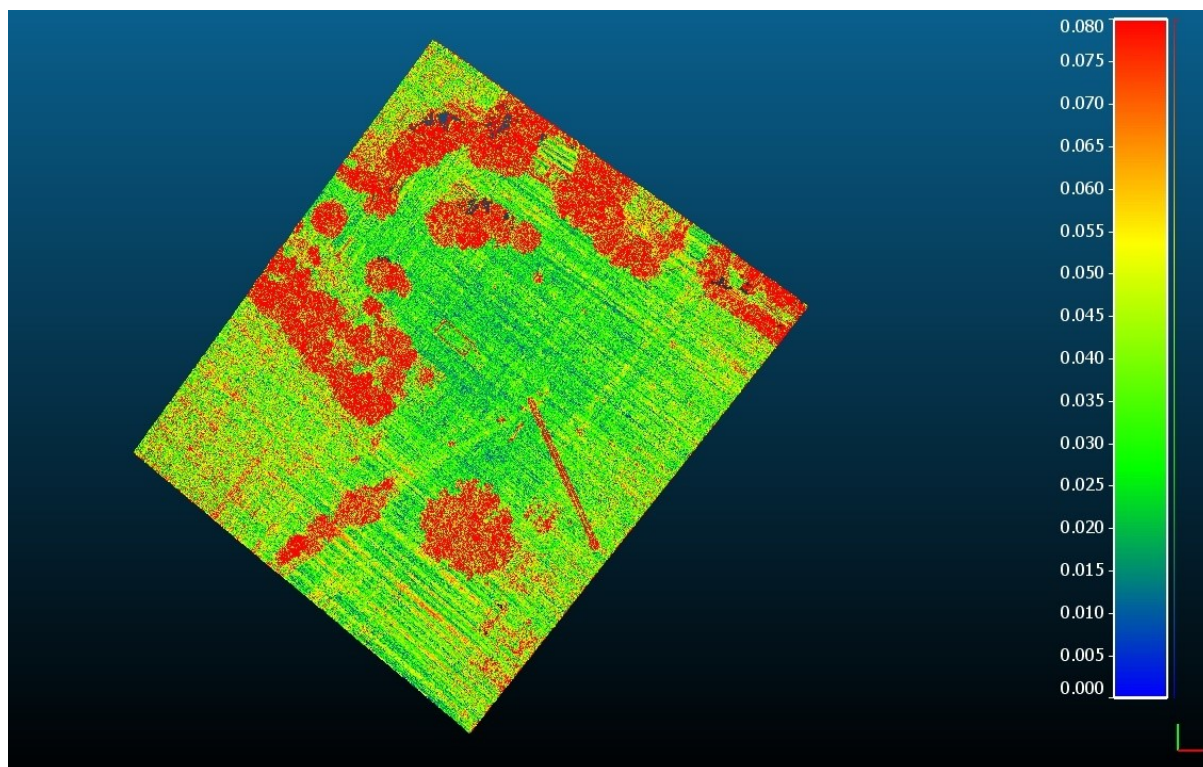


Graf 5.5: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace BA - kombinace 1 (O1)

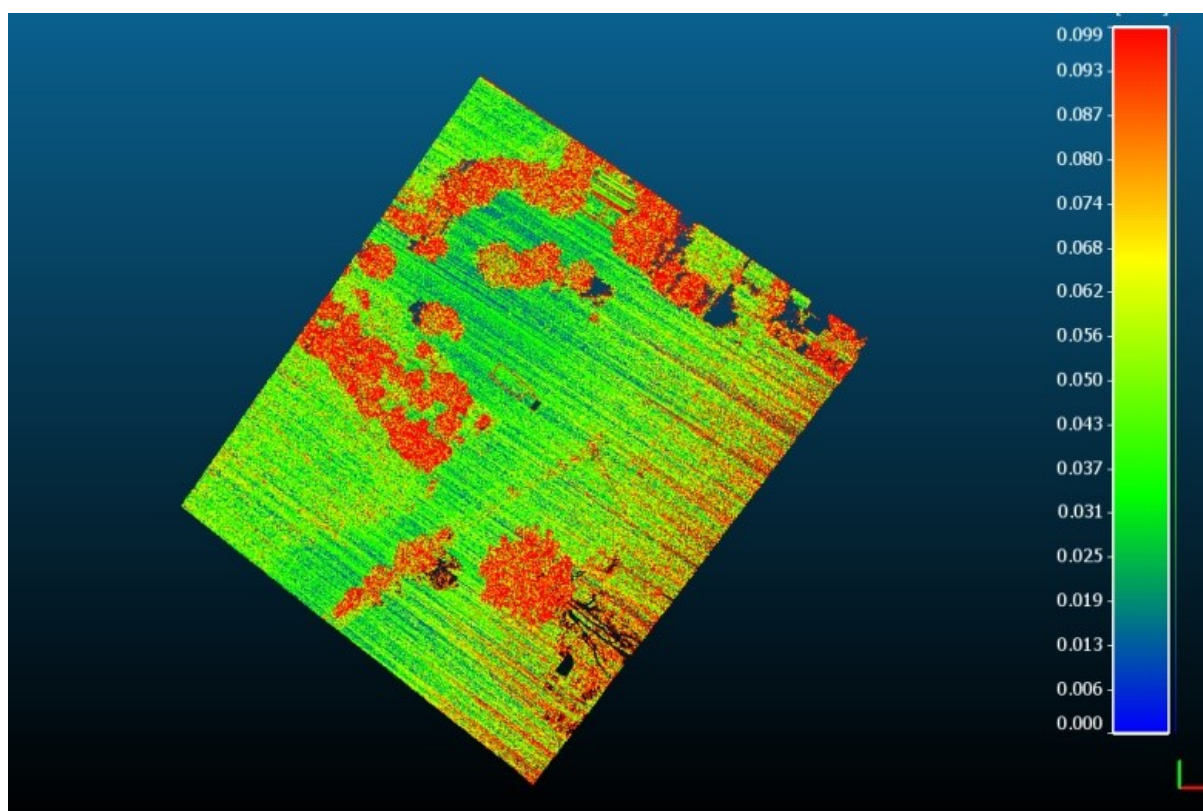


Graf 5.6: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace BA - kombinace 2 (O1)

U výše uvedených korekcí BA kalibraci nelze spatřit žádný výrazný vztah mezi dvěma kombinacemi (tab. 5.8). Četnosti vzdáleností hledaných ploch (graf 5.5 a graf 5.6) jsou velmi podobné, jako v případě použití pouze kalibrace LA, především pak u druhé kombinace, u níž lze sledovat výrazný posun některých ploch podél normály za hraniční hodnotu 0.02 metru. V případě provedených reziduí (obr. 5.5 a obr. 5.6) je výsledek velmi podobný, jako v případě provedení LA a BA kalibrace. Především pak u kombinace 2 lze vidět, že je maximální odchylka nastavena na téměř 0.1 metru. To znamená, že provedením pouze BA kalibrace lze dosáhnout lepší geometrické přesnosti.



Obrázek 5.5: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace BA - kombinace 1 (O1)



Obrázek 5.6: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace BA - kombinace 2 (O1)

5.1.5 Celkové vyrovnnání pásů

Nyní je vhodné udělat vyrovnnání pásů a to jak pomocí posunu, tak pomocí rotace.

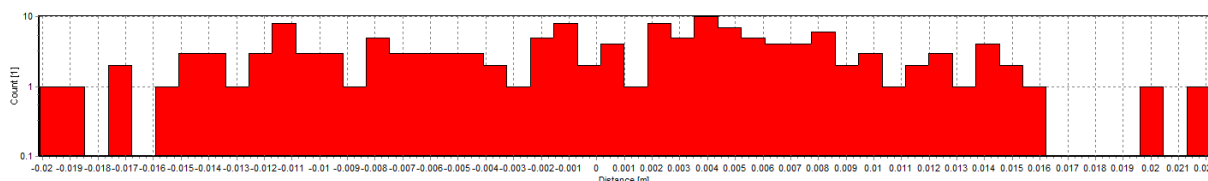
Kombinace	Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
1	12	140	0.009
2	12	246	0.010

Tabulka 5.9: Výsledky výpočtu – vyrovnnání pásů (O1)

U vyrovnnání pásů pomocí rotací a posunů se zvýšila směrodatná odchylka na 0.009 metru u kombinace 1 a na 0.01 metru u kombinace 2. Je zde tedy patrné zlepšení slícování dat (tab. 5.9).

Název pásu	ω [°]	φ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
_123131	-0.042	0.561	-0.561	-0.066	-0.211	-0.007
_123815	-0.066	-0.024	-0.017	-0.050	-0.123	-0.002

Tabulka 5.10: Hodnoty SA – vyrovnnání pásů - kombinace 1 (O1)

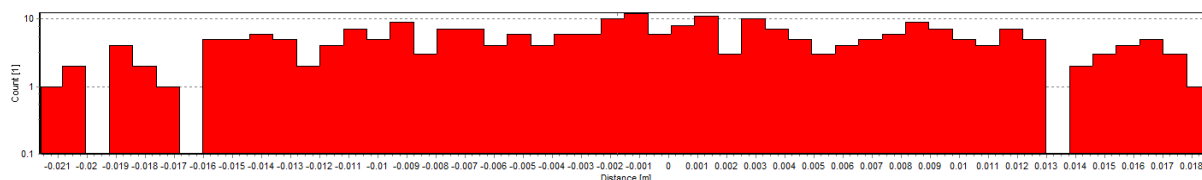


Graf 5.7: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnnání pásů - kombinace 1 (O1)

Jak je vidět výše, pro vyrovnnání pásů se využily vypočtené parametry jak rotace, tak posunu (tab. 5.10). Histogramy jsou téměř totožné (graf 5.7). Je však ještě patrné, že prahová hodnota pro hledání ploch podél maximální délky normál se pro tuto konkrétní oblast může nastavit na 0.016 metru. V těchto histogramech lze spatřit, že téměř všechny nalezené plochy, které byly vybrány, jsou pod hodnotou 0.016 metru.

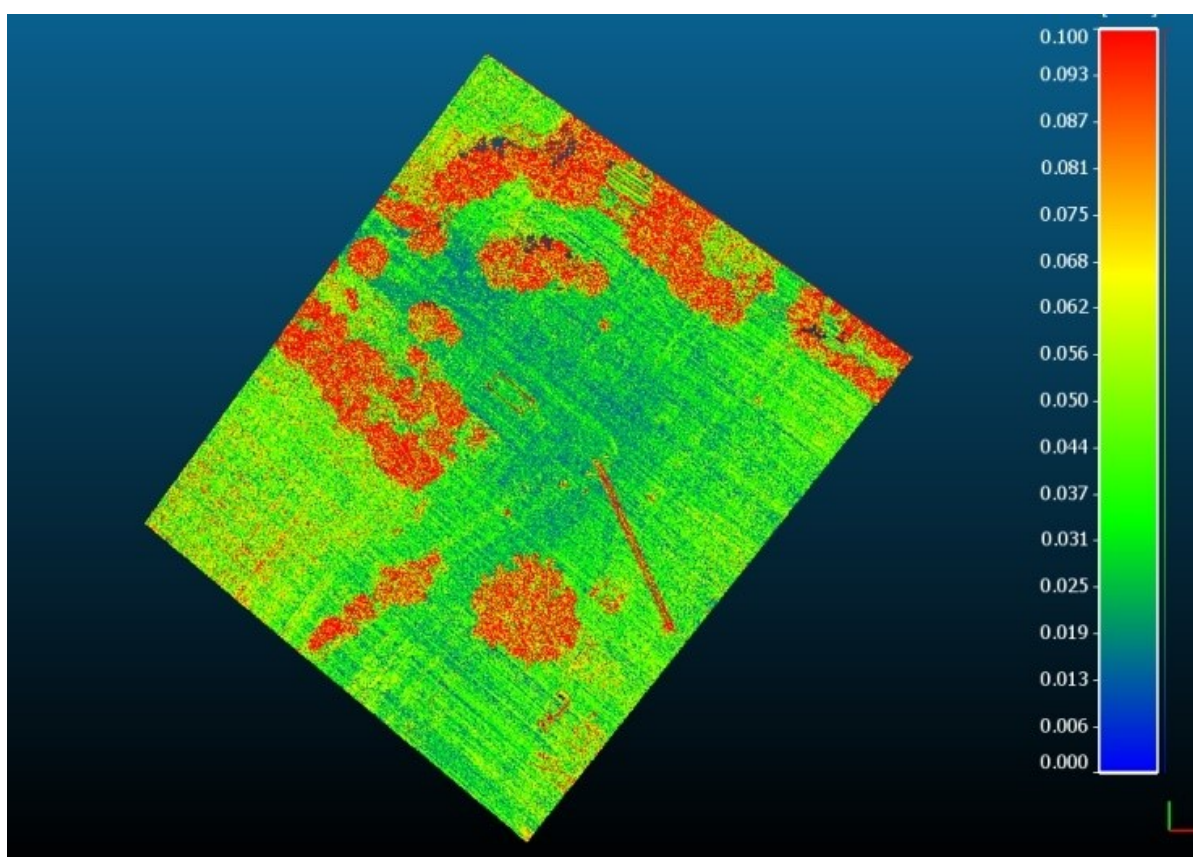
Název pásu	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
_123815	-0.027	-0.058	0.086	-0.083	-0.067	-0.006
_123938	-0.029	-0.260	0.128	0.017	0.048	-0.001

Tabulka 5.11: Hodnoty SA – vyrovnání pásů - kombinace 2 (O1)

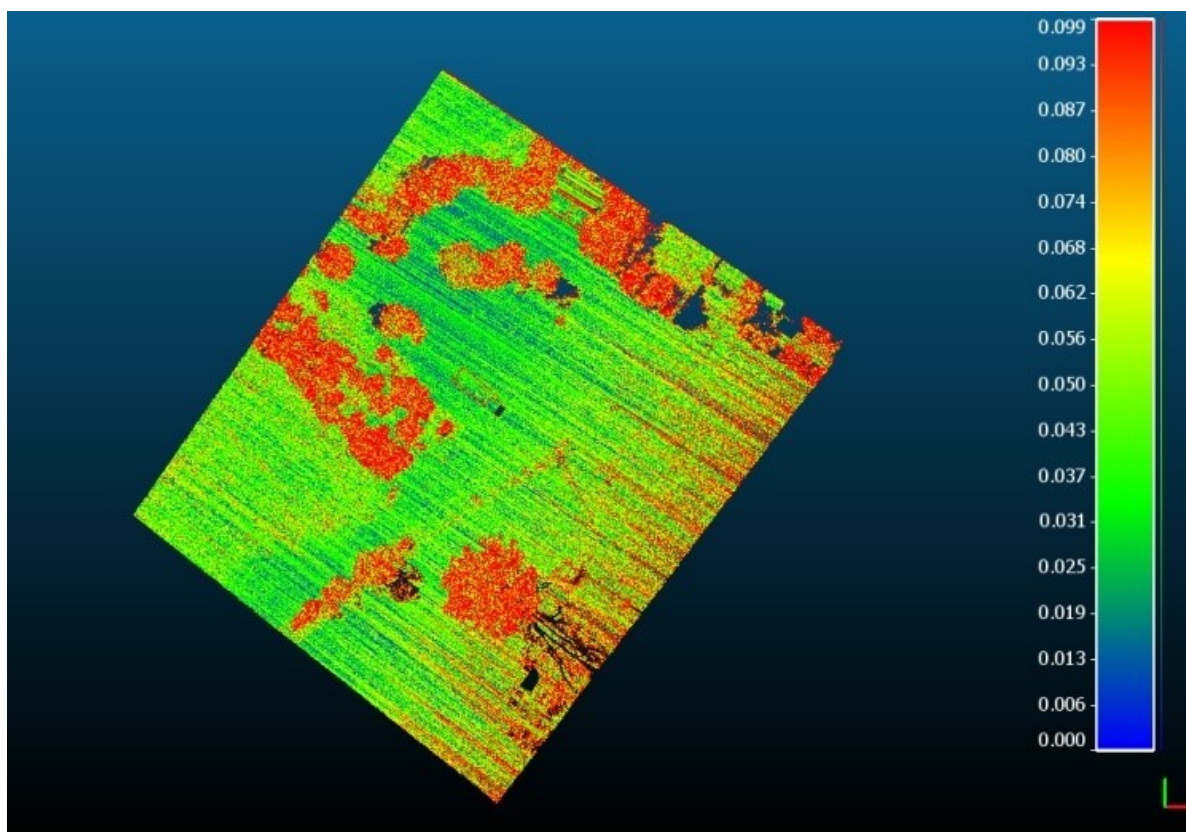


Graf 5.8: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnání pásů - kombinace 2 (O1)

Stejně tak u kombinace 2 lze tuto prahovou hodnotu nalézt. Nicméně histogram je podobný grafům v předchozích případech (graf 5.8 a tab. 5.11). U hodnocení reziduí (obr. 5.7 a obr. 5.8) nezpracovaného bodového mračka a bodového mračka zpracovaného SA je zajímavá především kombinace 2. Vyrovnání pásu zlepšilo rezidua na kraji pásu.



Obrázek 5.7: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a vyrovnání pásů - kombinace 1 (O1)



Obrázek 5.8: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a vyrovnání pásů - kombinace 2 (O1)

5.1.6 Vyrovnání pásů - posun

Při sledování vyrovnání pásů (SA) se zaměříme na tři možné parametry. Sledujeme vliv posunu, rotace pásů a jejich kombinaci. Stejně jako při kalibraci LA a BA se zaměříme na kombinace směrů naskenovaných pásů. První částí je sledování posunu pásů.

Kombinace	Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
1	6	140	0.018
2	6	236	0.019

Tabulka 5.12: Výsledky výpočtu – vyrovnání pásů - posun (O1)

Pokud použijeme pouze posun naskenovaných pásů, výsledná směrodatná odchylka je 0.018 metru, respektive 0.019 metru (tab. 5.12).

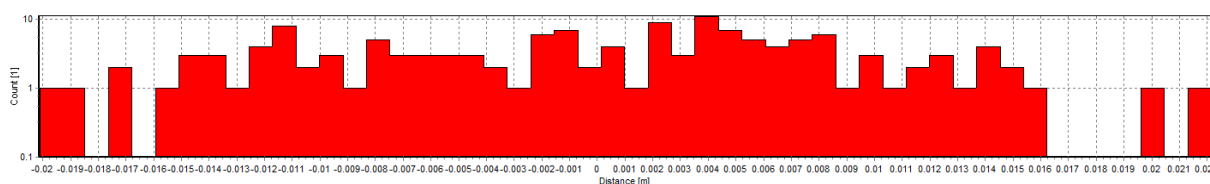
Název pásu	x [m]	y [m]	z [m]
_123131	0.067	-0.211	-0.007
_123815	0.051	-0.123	0.002

Tabulka 5.13: Hodnoty SA – vyrovnání pásů - posun – kombinace 1 (O1)

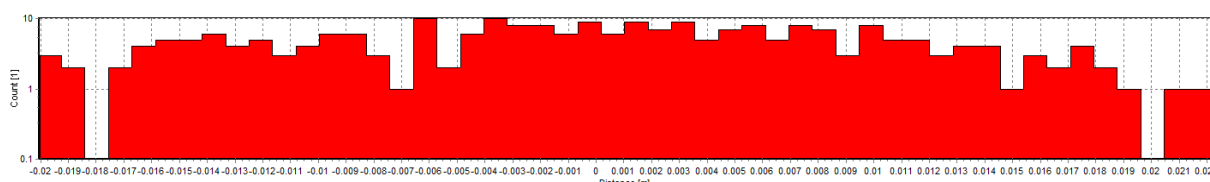
Název pásu	x [m]	y [m]	z [m]
_123815	-0.068	-0.129	-0.002
_123938	0.032	-0.056	0.003

Tabulka 5.14: Hodnoty SA – vyrovnání pásů - posun – kombinace 2 (O1)

V kontextu vlivu jednotlivých složek vyrovnání pásů je zde možné sledovat malý posun ve výšce pásů. Jak bylo zmíněno v teoretické části práce, je vliv ze souřadnice opravdu velmi malý (tab. 5.13 a tab. 5.14). V tomto případě se tento předpoklad potvrdil.

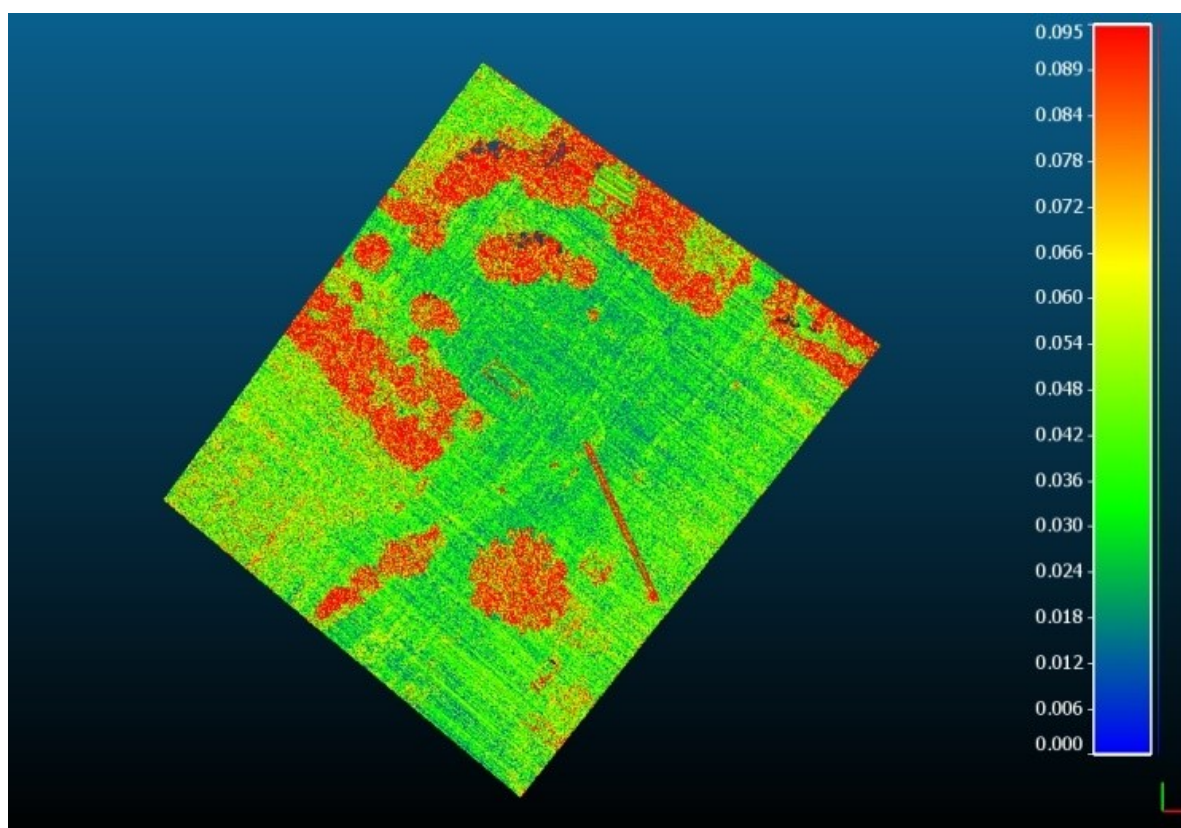


Graf 5.9: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnání pásů - posun - kombinace 1 (O1)

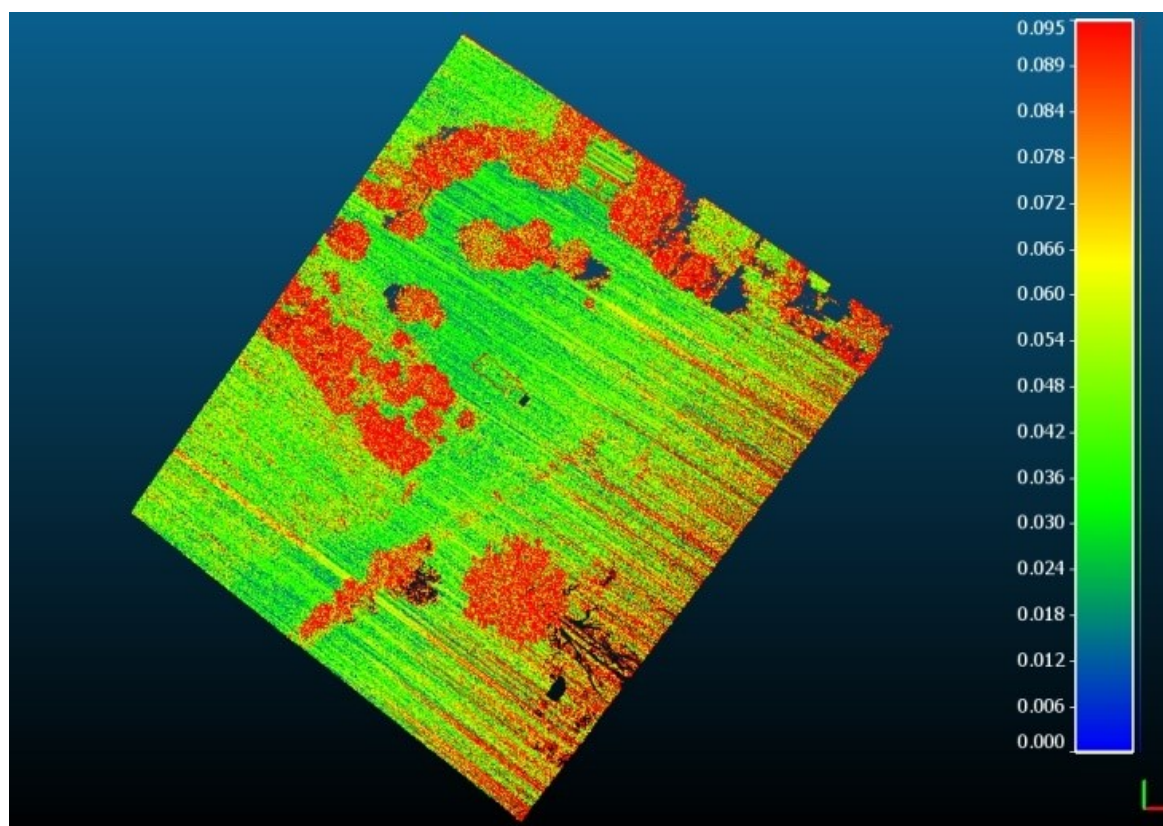


Graf 5.10: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnání pásů - posun - kombinace 2 (O1)

Histogramy četností jsou víceméně velmi podobné grafům z kalibrace LA a BA (graf 5.9 a graf 5.10). U kombinace 2 lze vidět větší četnost i u prahové hodnoty normály u 0.02 metru. Dále je pak několik ploch, především u kombinace 2, které posunem SA zvětšili rozdíly mezi jednotlivými plochami podél normály nad prahovou hodnotu 0.02 metru (druhý graf u prahové hodnoty 0.02 metru). Na rozdíl od předchozí kombinace lze u provedených reziduí bodových mračen (obr. 5.9 a obr. 5.10) spatřit u kombinace 2 větší úpravu bodového mračna na kraji pásu.



Obrázek 5.9: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a vyrovnání pásů - posun - kombinace 1 (O1)



Obrázek 5.10: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a vyrovnání pásů - posun - kombinace 2 (O1)

5.1.7 Vyrovnání pásů - rotace

Jak bylo zmíněno výše, nyní je potřeba provést vyrovnání pásů jen pomocí rotací.

Kombinace	Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
1	6	140	0.020
2	6	236	0.017

Tabulka 5.15: Výsledky výpočtu – vyrovnání pásů - posun (O1)

Oproti samostatným posunům se změnila směrodatná odchylka u kombinace 1 na 0.02 metru, respektive na 0.017 metru u kombinace 2 (tab. 5.15). Přesto tyto směrodatné odchylky neukazují zhoršení přesnosti. Pro toto konstatování by bylo nutné, aby se zvýšila směrodatná odchylka mnohem více. Zde je však prostor pro rozbor přesnosti, zda se opravdu jedná o zhoršení kvality slícování naskenovaných dat.

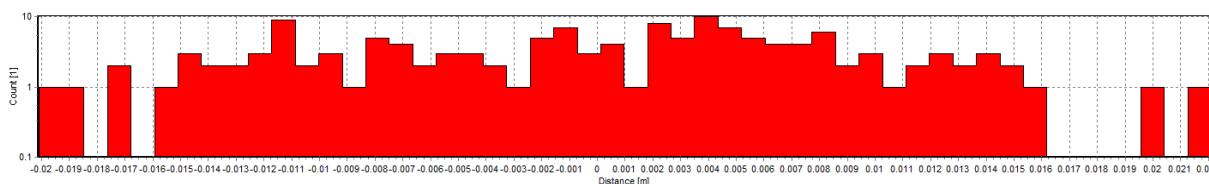
Název pásu	ω [°]	φ [°]	κ [°]
_123131	-0.042	-0.561	-0.560
_123815	-0.066	-0.024	-0.017

Tabulka 5.16: Hodnoty SA – vyrovnání pásů - rotace - kombinace 1 (O1)

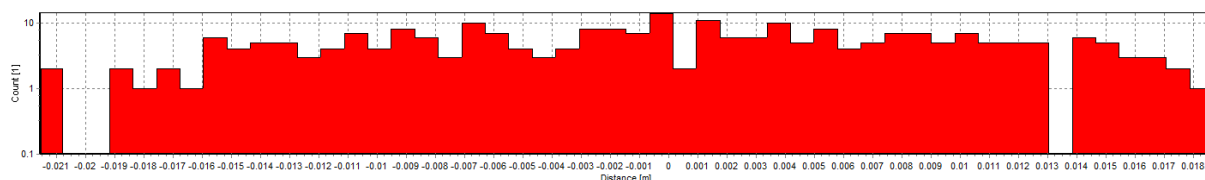
Název pásu	ω [°]	φ [°]	κ [°]
_123815	-0.028	0.054	-0.093
_123938	-0.028	-0.271	-0.109

Tabulka 5.17: Hodnoty SA – vyrovnání pásů - rotace – kombinace 2 (O1)

U rotací jsou všechny vlivy, respektive všechny rotace, stejnoměrné. Nedochází tu k žádnému dominantnímu ani submisivnímu vlivu jedné z rotací (tab. 5.16 a tab. 5.17).

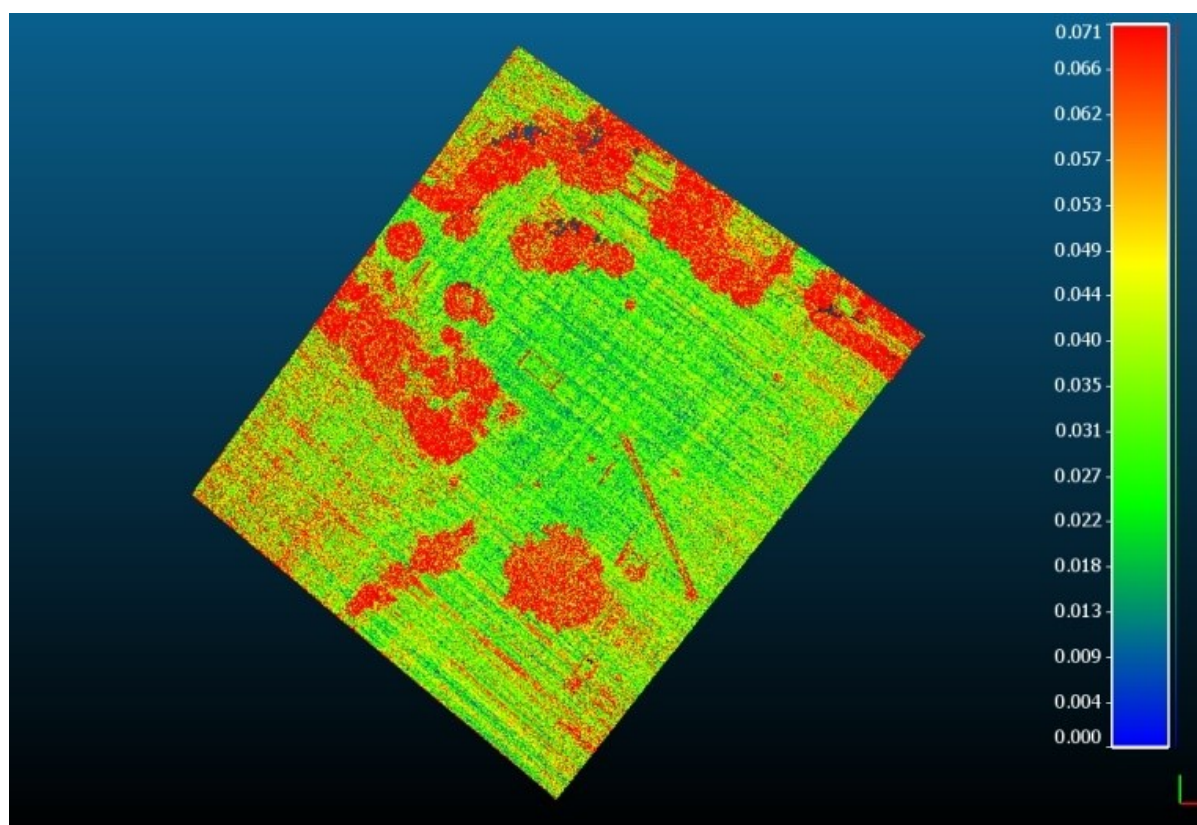


Graf 5.11: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnání pásů - rotace - kombinace 1 (O1)

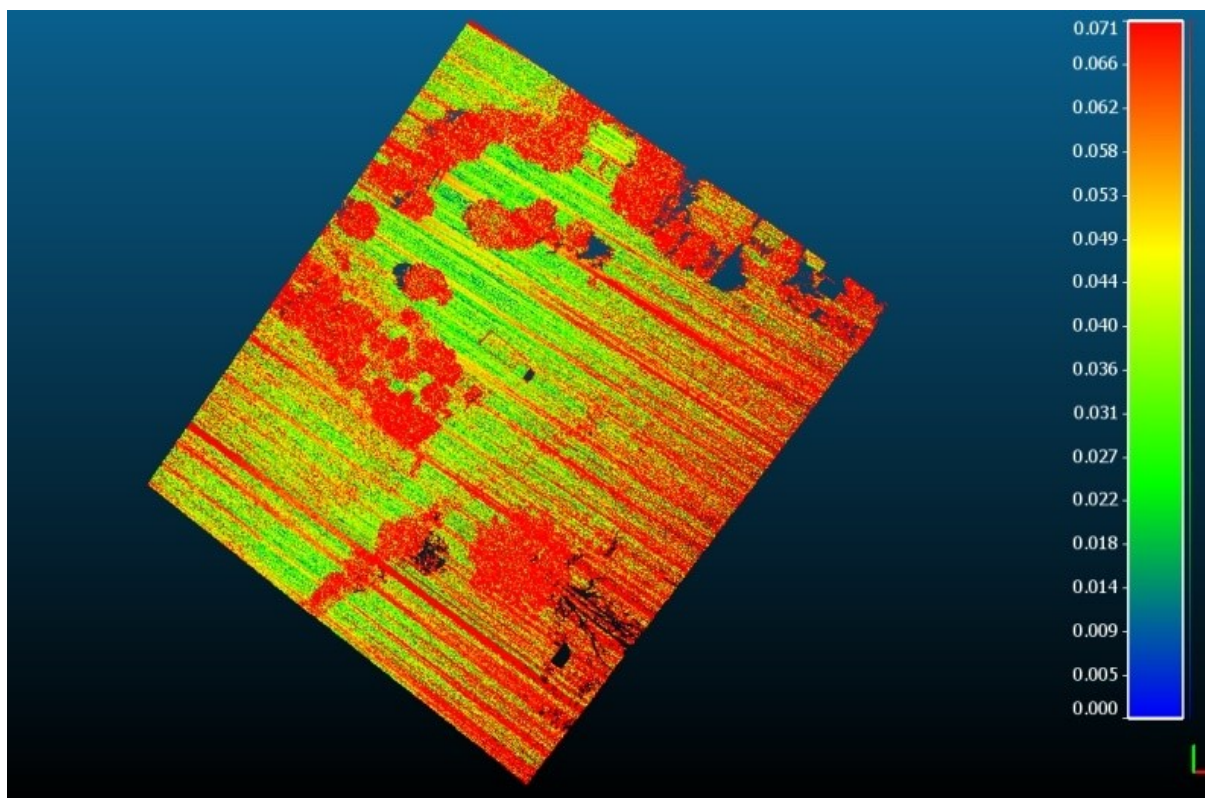


Graf 5.12: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnání pásů - rotace - kombinace 2 (O1)

Grafy četností nevykazují žádné výrazné rozdíly oproti histogramům u posunu (graf 5.11 a graf 5.12). Za zmínku stojí rozdíl u kombinace 2 u prahové hodnoty 0.02 metru, kdy se u žádné hledané plochy, na rozdíl u posunu, nezvýšil rozdíl normály dvou hledaných ploch. Z hodnot reziduí neupraveného a upraveného bodového mračna (obr. 5.11 a obr. 5.12) lze odečíst, především a hlavně u kombinace 2, že došlo k menšímu posunu (hodnoty reziduí jsou 0.07 metru). Přesto lze pozorovat, že došlo k posunu, nebo i rotaci celého bodového mračna.



Obrázek 5.11: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnání pásů - rotace - kombinace 1 (O1)



Obrázek 5.12: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a vyrovnání pásů - rotace - kombinace 2 (O1)

5.1.8 Kalibrace LA a BA a vyrovnání pásů

Pro posouzení vlivu LA a BA kalibrace a vyrovnání pásů je důležité také tyto úpravy a zpřesnění bodového mračka kombinovat.

Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
18	140	0.010

Tabulka 5.18: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA a SA – kombinace 1 (O1)

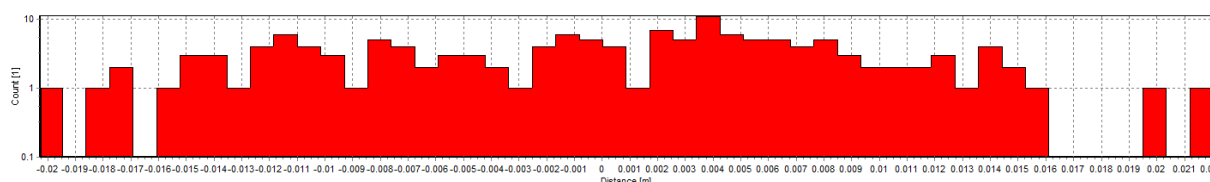
	ω [°]	φ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
Hodnoty kalibrace LA (x, y, z) a BA (ω , φ , κ)	0.20995	-0.10996	0.50113	0.152	0.001	-0.004

Tabulka 5.19: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 1 (O1)

Název pásu	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
_123131	-0.043	-0.552	-0.560	-0.066	-0.211	-0.007
_123815	-0.070	-0.029	-0.019	-0.058	-0.120	-0.002

Tabulka 5.20: Hodnoty SA – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 1 (O1)

V prvním případě byla provedena kombinací kalibrací a vyrovnání pásů u kombinace 1 (tab. 5.18, tab. 5.19 a tab. 5.20). V tomto případě je více neznámých, a proto je zde 18 stupňů volnosti. Směrodatná odchylka vyšla 0.01 metru, to znamená, že naprosto totožně jako v případě provedení pouze kalibrací nebo v případě provedení vyrovnání pásů. Proto zde můžeme poznamenat, že kombinace obou dvou metod nezlepšuje výslednou přesnost bodového mračna.



Graf 5.13: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci a SA – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 1 (O1)

Histogram četností (graf 5.13) vzdáleností hledaných ploch po kalibraci a vyrovnání pásů je velmi podobný jako v případě SA kombinace 1. Proto jej nelze více specifikovat.

Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
20	246	0.010

Tabulka 5.21: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA a SA – kombinace 2 (O1)

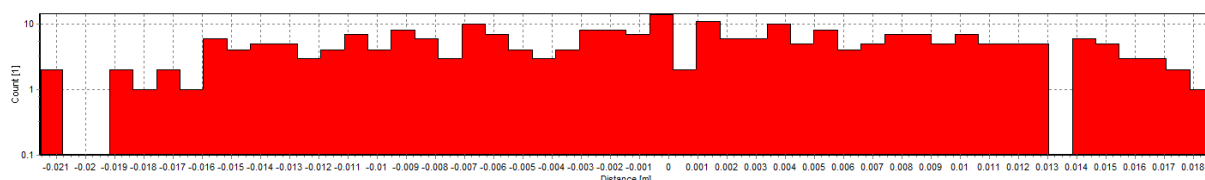
	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
Hodnoty kalibrace LA (x, y, z) a BA (ω , ϕ , κ)	0.19018	-0.15193	0.48724	0.187	0.001	-0.005

Tabulka 5.22: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 2 (O1)

Název pásu	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
_123815	-0.029	-0.058	0.103	-0.091	-0.060	-0.006
_123938	-0.029	-0.260	0.125	0.023	0.051	-0.001

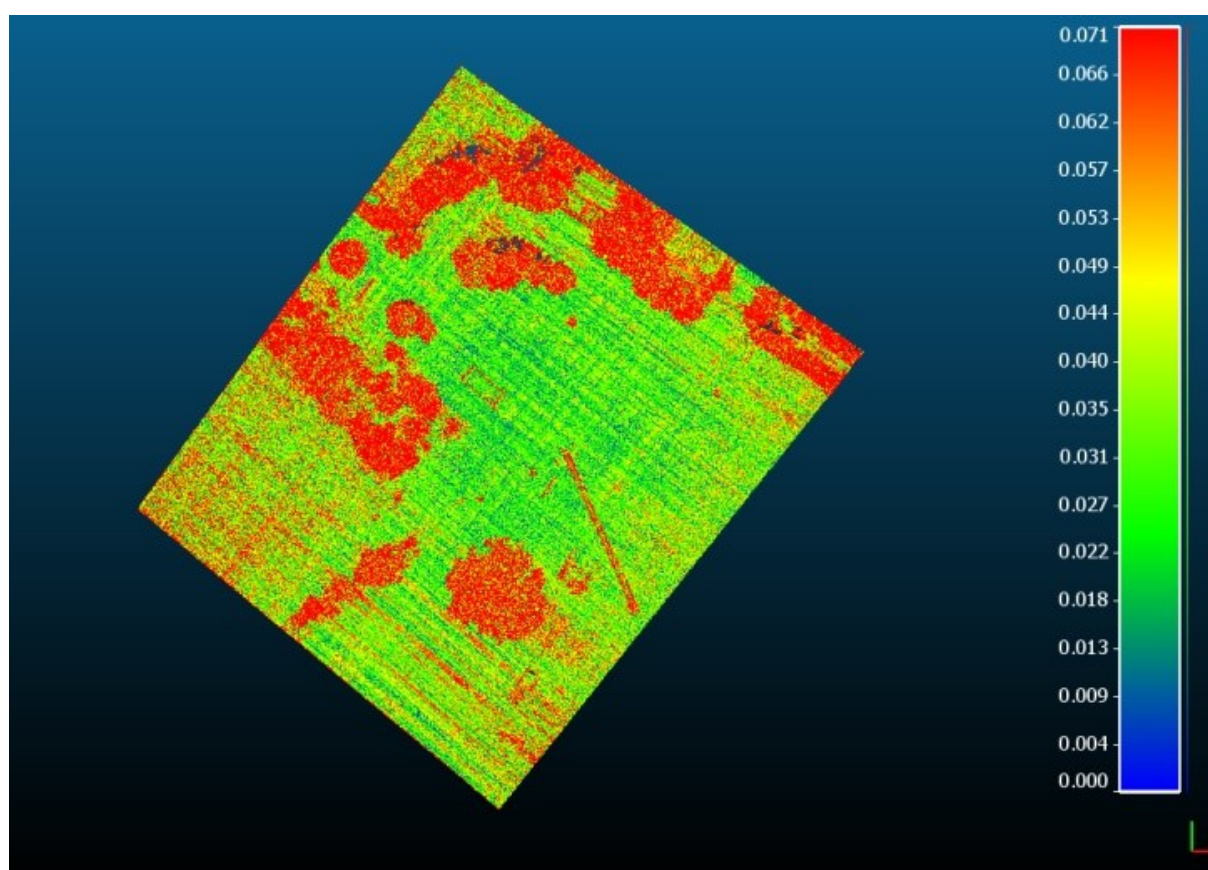
Tabulka 5.23: Hodnoty SA – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 2 (O1)

Z výše zmíněného (tab. 5.21, tab. 5.22 a tab. 5.23) vyplývá, že po kalibraci LA a BA a vyrovnaní pásů je směrodatná odchylka 0.01 metru. To znamená, že se výsledná přesnost nijak nezvýšila nebo nesnížila, je téměř totožná. Za zmínku stojí hodnoty kalibrací LA a BA, které se v závislosti na vybraném výpočtu vždy mění. Vyrovnané pásy jsou téměř totožné, jako tomu bylo v případě pouhého vyrovnaní pásů, bez kalibrací LA a BA.

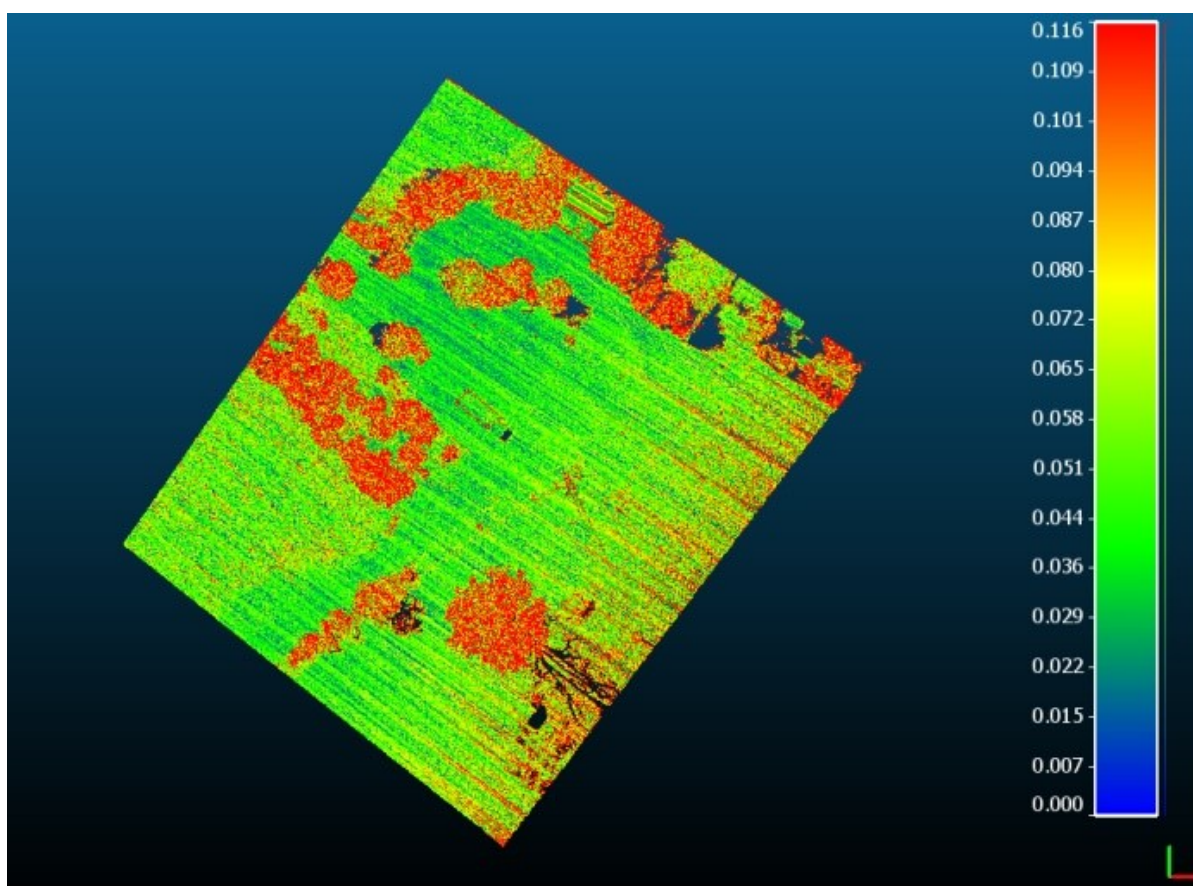


Graf 5.14: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci a SA – kalibrace LA a BA a SA - kombinace 2 (O1)

V případě histogramu četností (graf 5.14) zde není zde patrný žádný rozdíl, oproti grafům v předchozích případech. Hodnoty reziduí (obr. 5.13 a obr. 5.14) na bodovém mračnu jsou výraznější, oproti předchozím případům porovnání. Především pak u kombinace 2 lze vidět, že se celé bodové mračno výrazně zpřesnilo.



Obrázek 5.13: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA a BA a SA - kombinace 1 (O1)



Obrázek 5.14: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a kalibrace LA a BA a SA - kombinace 2 (O1)

5.1.9 Rezidua na kontrolních bodech

Další analytická metoda validace slícovaných dat spočívá v měření reziduí na kontrolních bodech, které se v bodovém mračnu nacházely. Pro kontrolu bylo vybráno pět jednoznačných bodů, jež se nacházely na terčích. Body na terčích byly určovány z průniku dvou úseček, které byly nataženy v programu Infinity přes úhlopříčku terčů. Kontrolní body na terčích byly vybrány z důvodu větší odrazivosti laserového paprsku a jejich dobré viditelnosti v bodovém mračnu. Pokud by laserový skener obsahoval CCD, bylo by možné pro porovnání vybrat větší počet kontrolních bodů. Pro kombinaci 1 byly vybrány body 5, 6, 11, 12 a 13.

číslo bodu	5	6	11	12	13
Δ_{pi} nekalibrované bodové mračno [mm]	42	26	81	55	48
Δ_{pi} kalibrace LA a BA [mm]	21	20	64	33	33
Δ_{pi} kalibrace BA [mm]	35	26	74	49	51
Δ_{pi} kalibrace LA [mm]	32	26	71	48	48
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) [mm]	19	23	60	33	32
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) - posun [mm]	25	20	59	40	33
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) - rotace [mm]	24	25	66	35	32
Δ_{pi} kalibrace LA a BA a SA [mm]	20	25	61	35	33

Tabulka 5.24: Rezidua na kontrolních bodech v mm – software Infinity – kombinace 1 (O1)

U kombinace 1 bylo na kontrolních bodech v bodovém mračnu odměřeno osm kombinací (tab. 5.24): nekalibrované bodové mračno, u použití kalibrace LA a BA, u kalibrace BA a u kalibrace LA. Dále pak u vyrovnaní pásů, vyrovnaní pásů za použití rotace, vyrovnaní pásů za použití pouze rotace a u využití kalibrace LA a BA a vyrovnaní pásů. Nejhorší rezidua byla naměřena na bodě č. 11, a to u nekalibrovaného mračna až 0.081 metru. Tento bod však byl špatně odečitatelný, protože nebyl usazen dostatečně vysoko nad okolní terén, takže splýval s naskenovanou vegetací. Proto při analytickém odečítání středu terče dochází k vizuální chybě u hran terče. Přesto lze konstatovat, a to neohledně na jakékoli reziduum v této kombinaci, že při použití jakéhokoli vyrovnaní (kombinací kalibrace LA a BA a vyrovnaní pásů) bylo prokázáno zlepšení přesnosti slícování na kontrolních bodech. U jednotlivých postupů ale není možné najít rozdíl. Nejlepší kvalitu měl bod č. 5.

číslo bodu	5	6	11	12	13
Δ_{pi} nekalibrované bodové mračno [mm]	67	74	X	39	40
Δ_{pi} kalibrace LA a BA [mm]	34	28	X	12	23
Δ_{pi} kalibrace BA [mm]	56	35	X	25	33
Δ_{pi} kalibrace LA [mm]	45	30	X	20	33
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) [mm]	30	29	X	15	20
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) - posun [mm]	32	25	X	17	20
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) - rotace [mm]	25	26	X	18	18
Δ_{pi} kalibrace LA a BA a SA [mm]	32	30	X	13	19

Tabulka 5.25: Rezidua na kontrolních bodech v mm – software Infinity - kombinace 2 (O1)

U měření reziduí (tab. 5.25) kombinace 2 nebyl zaměřen bod č. 11, protože se nenacházel na obou naskenovaných pásech. Největší rezidua byla zjištěna u bodů 5 a 6. Nejmenší u bodu 12. Tato rezidua byla víceméně stejná jak u kalibrovaného bodového mračna, tak u bodového mračna vytvořeného z vyrovnaných pásů. V příloze jsou uvedeny tabulky s hodnotami reziduí v poloze (Y, X) a ve výšce pro všechny vypočítané kombinace.

5.2 Oblast Dlouhá Ves

5.2.1 Parametry hledání společných ploch slícování

Stejně jako v případě oblasti Horní Vidim obsahuje první část výsledků hledání parametrů společných ploch slícování. Rovněž i zde budeme měnit základní parametry. U hledání bodů v poloze zvolíme parametry 0.05, 0.3 a 0.5 metru. U úhlové tolerance zvolíme úhly 1 °, 20 ° a 45 ° a pro maximální vzdálenost normály dvou ploch zvolíme vzdálenosti 0.01, 0.02, 0.1 a 0.3 metru.

Hledání bodů v poloze [m]	Úhlová tolerance [°]	Maximální vzdálenost normály [m]	Nalezených ploch	Směrodatná odchylka [m]
0.1	1	0.02	280	0.010
0.3	1	0.02	1004	0.011
0.5	1	0.02	1345	0.011
0.1	20	0.02	490	0.011
0.3	20	0.02	1846	0.011
0.5	20	0.02	2624	0.013
0.1	45	0.02	490	0.011
0.3	45	0.02	1850	0.011
0.5	45	0.02	2630	0.013
0.1	1	0.1	499	0.032
0.1	1	0.01	146	0.007
0.3	1	0.01	551	0.005
0.5	1	0.01	742	0.005

Tabulka 5.26: Parametry hledání ploch slícování (O2)

Stejně jako v případě první oblasti, rovněž zde je velmi patrný vliv volby maximální vzdálenosti normály (tab. 5.26). Rozdílné však je zvýšení počtu nalezených ploch, pokud je zvolena větší úhlová tolerance. Počet ploch je samozřejmě vyšší, protože se jedná o zastavěné území.

Nejvýznamnějším parametrem je maximální vzdálenost normály. Jestliže ji zvětšíme na hodnotu 0.1 metru, výrazně se zvýší směrodatná odchylka, a tak i celé slícování dat. Nejvhodnějším parametrem by zde mohla být kombinace 0.3 metru v poloze, 20 ° úhlové tolerance a 0.01 metru maximální vzdálenosti normály. Přesto kvůli zobrazovaným histogramům je ponechána maximální vzdálenost podél normály na hodnotě 0.02 metru.

Kvůli charakteru území je zvolena úhlová tolerance na 20° a hledání v poloze na 0.1 metru. Pro následnou analýzu jsou tedy využity tyto parametry:

Hledání bodů v poloze [m]	Úhlová tolerance $[\circ]$	Maximální vzdálenost normály [m]
0.1	20	0.02

Tabulka 5.27: Použité parametry hledání ploch slícování (O2)

5.2.2 Kalibrace LA a BA

Jako první využijeme parametry hledání ploch slícování pro kalibraci LA a BA.

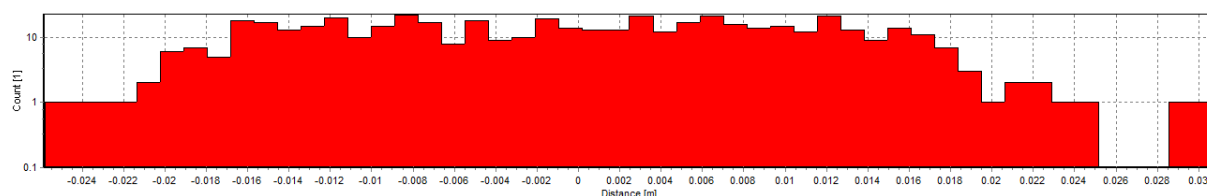
Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
6	490	0.011

Tabulka 5.28: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA (O2)

U kalibrací LA a BA vyšla směrodatná odchylka 0.011 metru, což je podobný výsledek, jako v případě prvního skenovaného území (tab. 5.28).

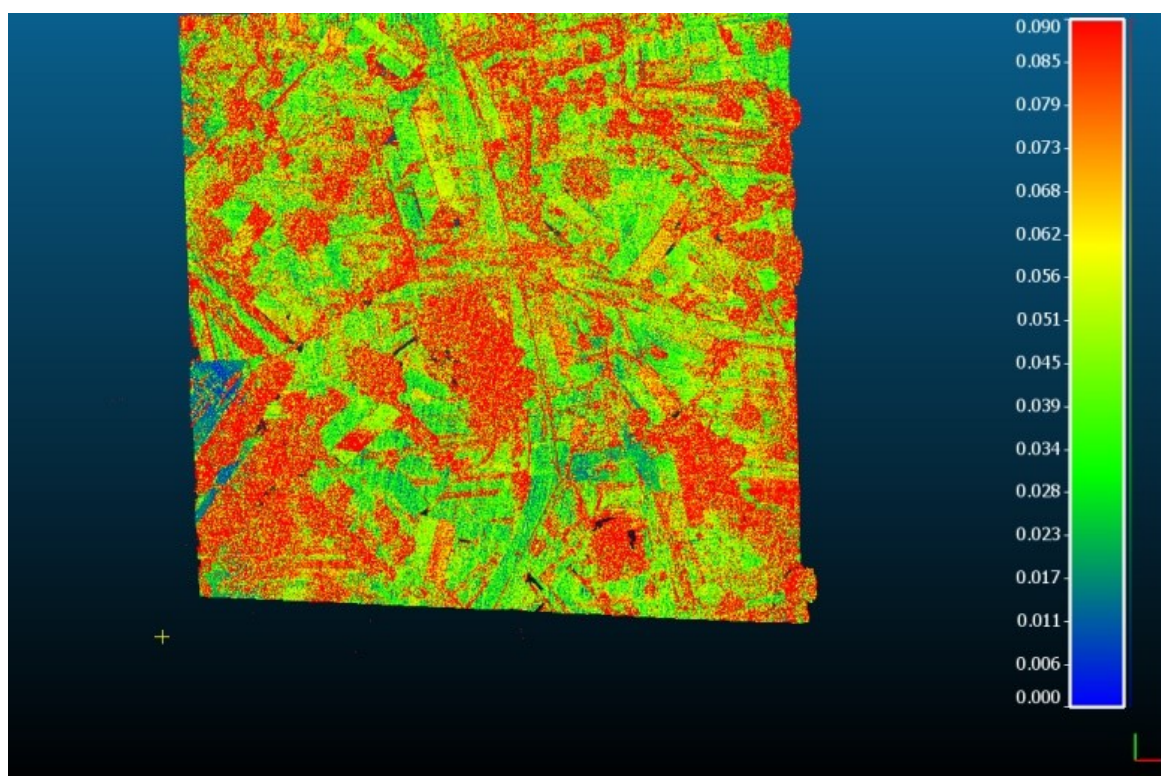
	ω $[\circ]$	φ $[\circ]$	κ $[\circ]$	x [m]	y [m]	z [m]
Hodnoty kalibrace LA (x, y, z) a BA (ω , φ , κ)	0.14767	-0.05495	0.25648	0.164	-0.024	0.051

Tabulka 5.29: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA (O2)



Graf 5.15: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA a BA (O2)

Z výsledků hodnot kalibrací LA a BA (tab. 5.29) lze spatřit, že hodnoty BA kalibrací jsou velmi rozdílné oproti hodnotám z první oblasti. U LA hodnot takovéto změny nejsou. Z histogramu (graf 5.15) je patrné, že část nalezených ploch se kalibrací LA a BA posunula mimo prahovou maximální hodnotu vzdálenosti normál, až na 0.03 metru.



Obrázek 5.15: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a kalibrace LA a BA (O2)

U zobrazení reziduů (obr. 5.15) lze spatřit, že maximální odchylky („*cloud-to-cloud*“) jsou především u vegetace. Rovné plochy se provedení kalibrace LA a BA posunuly na rozdíl od nekalibrovaného bodového mračka o průměrnou hodnotu, a to o 0.05 metru.

5.2.3 Kalibrace LA

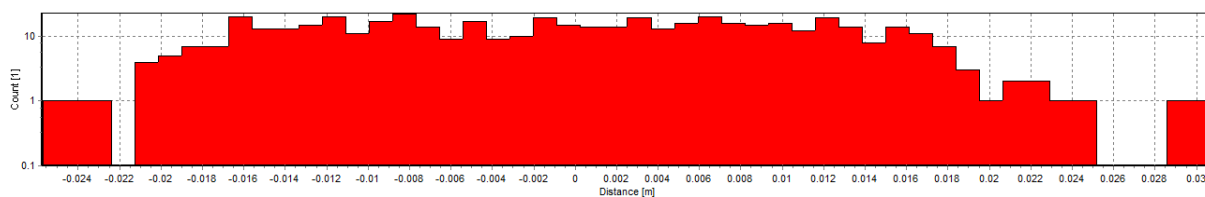
Stejně jako u předchozí oblasti bude zkoumán vliv jednotlivých kalibrací. První kombinací je provedení kalibrace LA.

Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
3	490	0.011

Tabulka 5.30: Výsledky výpočtu – kalibrace LA (O2)

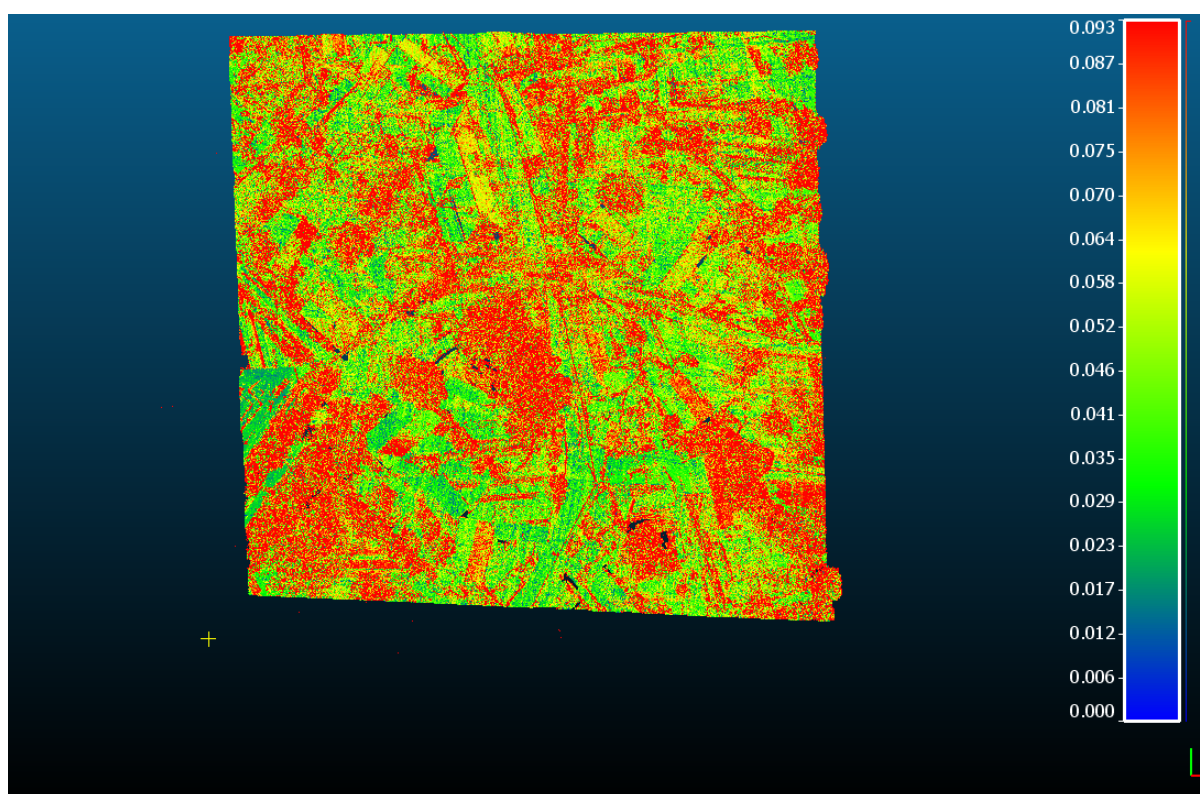
	x [m]	y [m]	z [m]
LA kal.	0.164	-0.024	0.048

Tabulka 5.31: Hodnoty LA kalibrací – kalibrace LA (O2)



Graf 5.16: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace LA (O2)

Výsledky jsou téměř totožné jako v případě předchozí kalibrace BA, LA (tab. 5.30, tab. 5.31 a graf 5.16) Směrodatná odchylka vyšla 0.011 metru. Na rozdíl od provedené kalibrace LA a BA je zde méně ploch, které se následně posunuly mimo prahovou hodnotu 0.02 metru (rozumějme parametr hodnoty maximální vzdálenosti normály zvolený u ploch slícování). Rezidua rozdílů mračen (obr. 5.16) u provedení pouze kalibrace LA jsou velmi podobná jako v předchozím případě.



Obrázek 5.16: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a kalibrace LA (O2)

5.2.4 Kalibrace BA

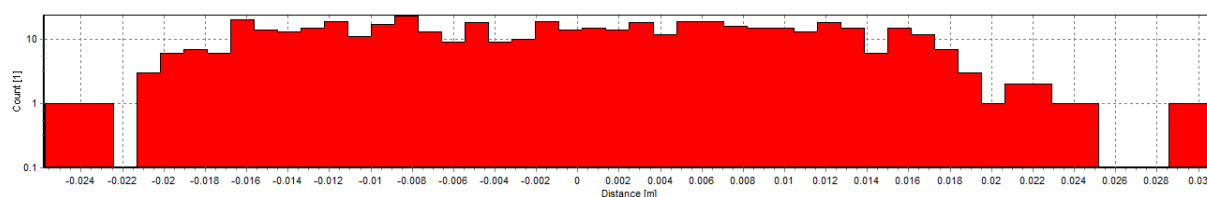
Následně provedeme pouze kalibraci BA.

Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
3	490	0.011

Tabulka 5.32: Výsledky výpočtu – kalibrace BA (O2)

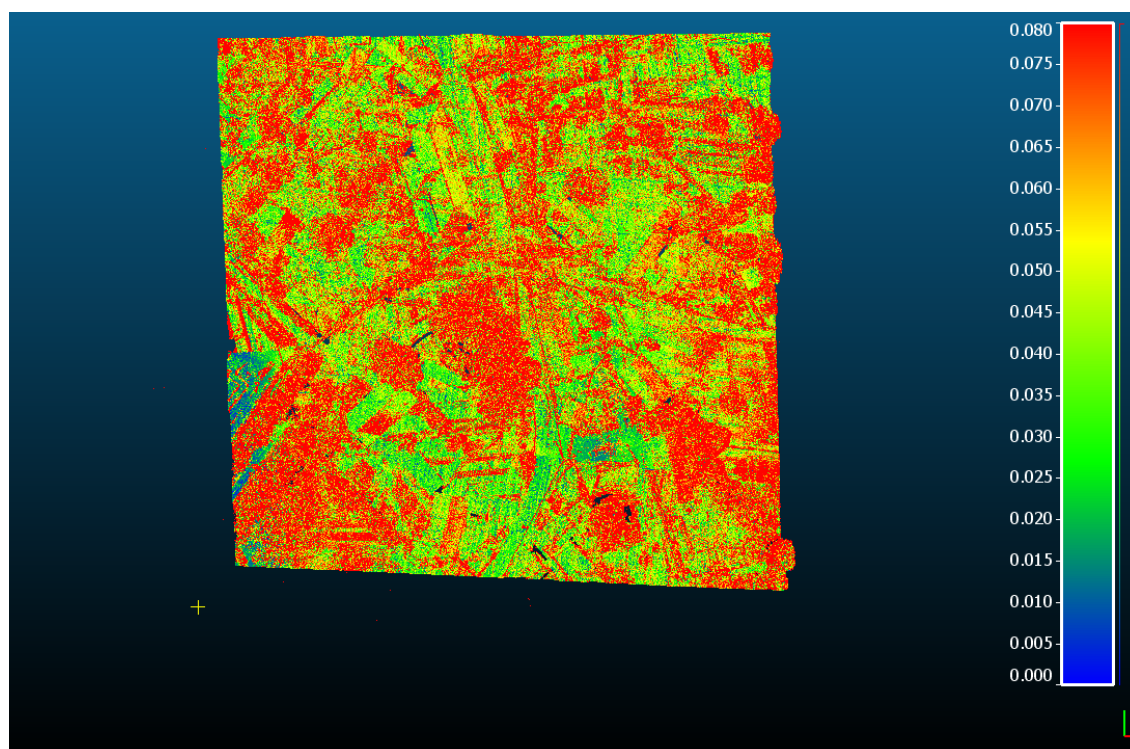
	ω [°]	φ [°]	κ [°]
BA kal.	0.14766	-0.05596	0.25649

Tabulka 5.33: Hodnoty BA kalibrací – kalibrace BA (O2)



Graf 5.17: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci – kalibrace BA (O2)

Výsledky (tab. 5.32, tab. 5.33 a graf 5.17) jsou totožné jako u kalibrace SA. Stejně tak u grafu reziduí porovnání bodových mračen.



Obrázek 5.17: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a kalibrace BA (O2)

5.2.5 Celkové vyrovnání pásů

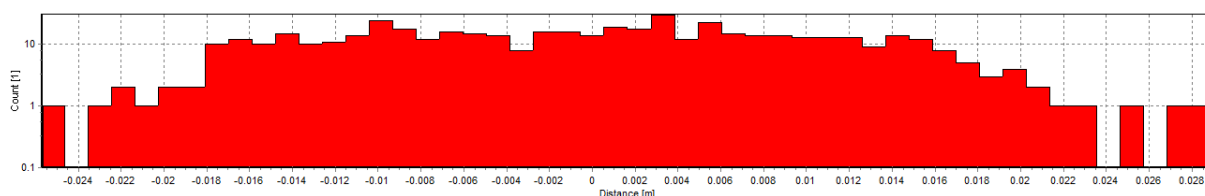
Po provedení kalibrací LA a BA je nyní potřeba provést metodu vyrovnání pásů.

Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
48	490	0.010

Tabulka 5.34: Výsledky výpočtu – vyrovnání pásů (O2)

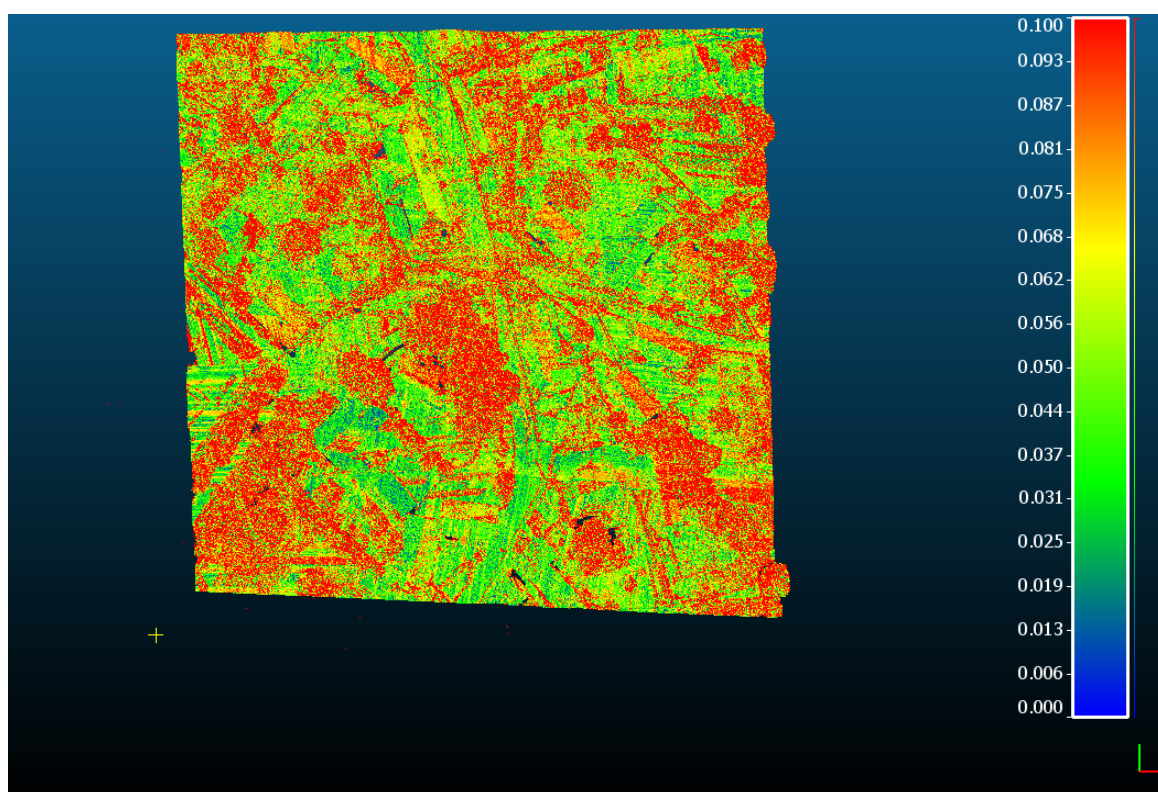
Název pásu	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
_111338	0.018	-0.076	0.086	0.014	0.084	-0.005
_111414	0.015	0.611	0.020	-0.305	-0.130	-0.029
_111543	0.076	0.029	0.179	0.060	-0.162	-0.133
_111718	0.068	-0.318	0.080	-0.147	-0.128	-0.127
_111847	0.082	0.011	0.021	0.051	-0.009	0.044
_111926	0.002	-0.430	-0.570	0.230	-0.163	0.116
_112033	0.027	0.368	-0.240	0.022	0.098	0.075
_112120	0.044	0.044	0.088	0.069	-0.150	0.047

Tabulka 5.35: Hodnoty SA – vyrovnání pásů (O2)



Graf 5.18: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnání pásů (O2)

Výsledky jsou velmi podobné výsledkům kalibrací LA a BA (tab. 5.34, tab. 5.35 a graf 5.18). Rozdíl najdeme především v histogramu, kdy posunutí ploch od hodnoty 0.02 metru nedosahuje hodnot 0.03 metru, jako to bylo v případě kalibrací. V případě zobrazení reziduí u metody SA (obr. 5.18) lze spatřit v levé dolní části, že se tento pás neposunul, případně moc nerotoval. Jedná se o pás (_111338), který měl v rámci metody SA nejmenší posuny, respektive rotace.



Obrázek 5.18: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnání pásů (O2)

5.2.6 Vyrovnání pásů – posun

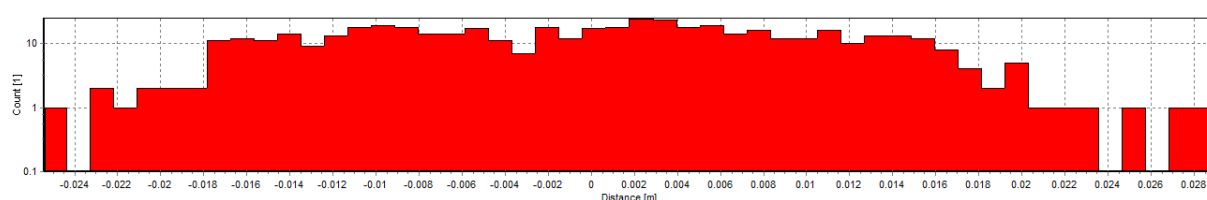
Následně otestujeme vyrovnání posunu všech naskenovaných pásů.

Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
24	490	0.015

Tabulka 5.36: Výsledky výpočtu – vyrovnání pásů – posun (O2)

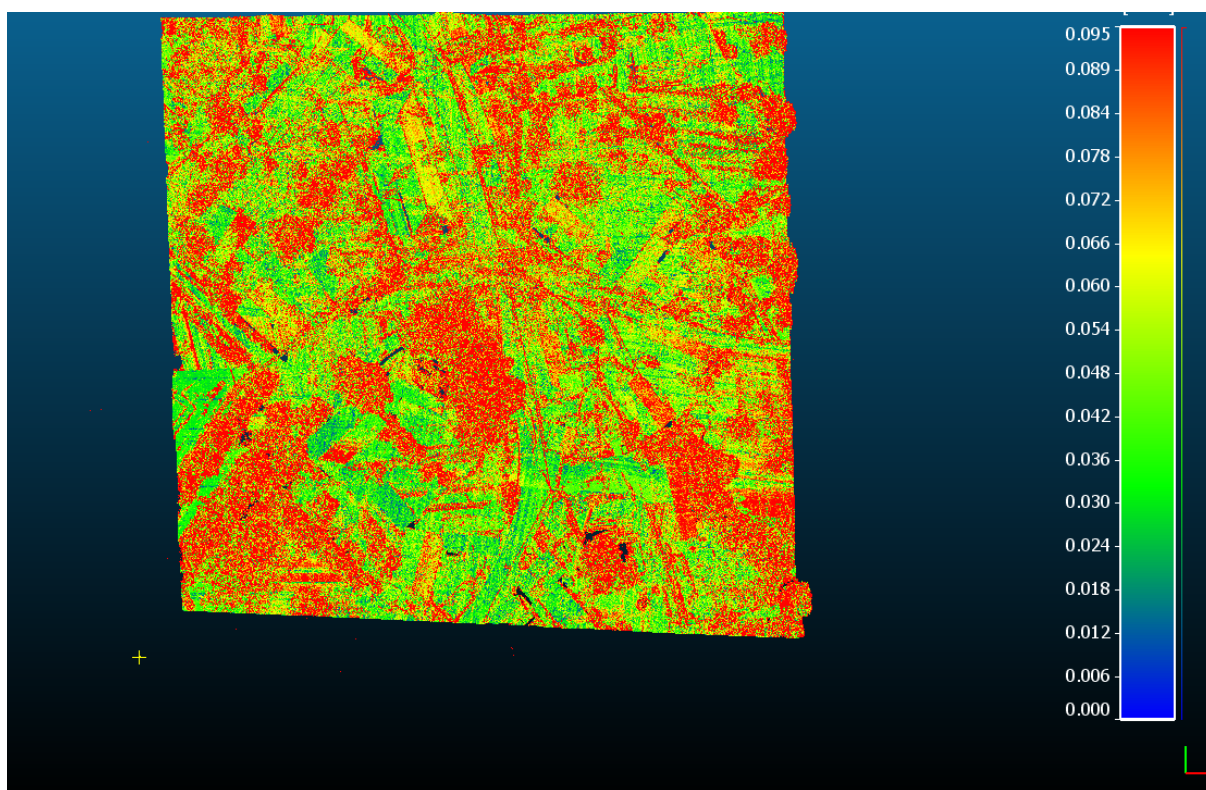
Název pásu	x [m]	y [m]	z [m]
_111338	0.017	0.086	-0.005
_111414	-0.305	-0.131	-0.029
_111543	0.060	-0.163	-0.133
_111718	-0.149	-0.129	-0.127
_111847	0.051	-0.009	0.044
_111926	0.233	-0.164	0.117
_112033	0.022	0.097	0.079
_112120	0.069	-0.151	0.047

Tabulka 5.37: Hodnoty SA – vyrovnání pásů - posun (O2)



Graf 5.19: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnání pásů - posun (O2)

Výsledky (tab. 5.36, tab. 5.37 a graf 5.19) jsou velmi podobné jako v předchozím případě. Nicméně za zmínku stojí směrodatná odchylka, jež vyšla 0.015 metru. V porovnání s předchozími odchylkami se jedná o zhoršení výsledku. Avšak jak bylo uvedeno výše, toto zhoršení je neprokazatelné. V případě reziduí (obr. 5.19) nelze spatřit žádné výrazné znaky provedených posunů.



Obrázek 5.19: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a vyrovnání pásů - posun (O2)

5.2.7 Vyrovnání pásů - rotace

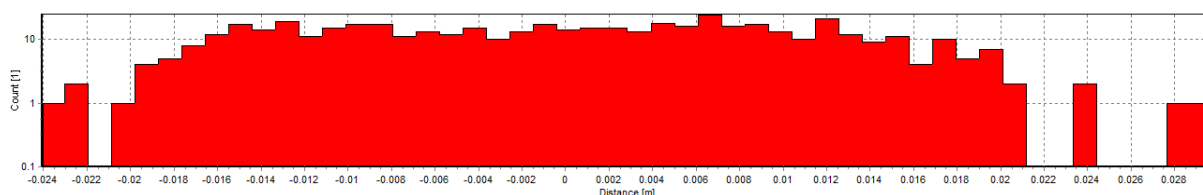
Následně nás čeká vyrovnání pásů jen pomocí rotace.

Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
24	490	0.015

Tabulka 5.38: Výsledky výpočtu – vyrovnání pásů - rotace (O2)

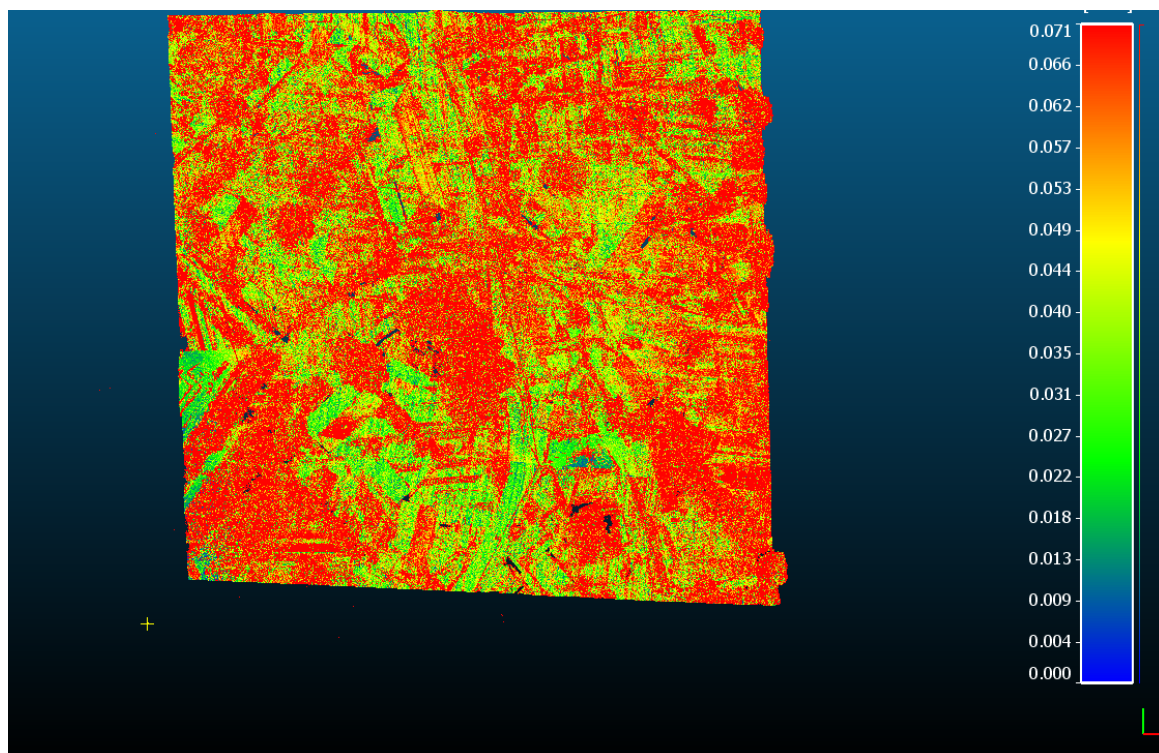
Název pásu	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]
_111338	0.021	-0.081	0.101
_111414	0.014	0.620	0.006
_111543	0.076	0.033	0.162
_111718	0.069	-0.319	0.080
_111847	0.084	0.006	0.025
_111926	0.002	-0.470	-0.569
_112033	0.027	0.360	-0.251
_112120	0.045	0.050	0.084

Tabulka 5.39: Hodnoty SA – vyrovnání pásů - rotace (O2)



Graf 5.20: Četnost vzdáleností hledaných ploch po SA – vyrovnání pásů - rotace (O2)

Výsledky jsou velmi podobné až stejné jako v předchozích případech (tab. 5.38, tab. 5.39 a graf 5.20). Pouze se zmenšila četnost ploch, které byly mimo prahovou hodnotu 0.02 metru. U grafu reziduí dvou kombinací bodových mračen (obr. 5.20) lze spatřit velký rozdíl velkého podílu zpracovaných dat. U celého bodového mračka je posun maximální odchylky 0.07 metru.



Obrázek 5.20: Rezidua nezpracovaného bodového mračka a vyrovnání pásů - rotace (O2)

5.2.8 Kalibrace LA a BA a vyrovnání pásů

Poslední kombinací, kterou je nutné provést je kombinace všech metod, které jsme v předchozích případech používali - tedy kalibraci LA, kalibraci BA a vyrovnání pásů.

Stupně volnosti	Počet observací	Směrodatná odchylka [m]
54	490	0.011

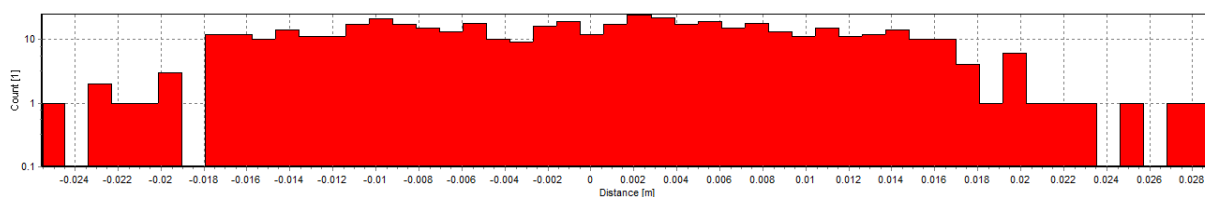
Tabulka 5.40: Výsledky výpočtu – kalibrace LA a BA a SA (O2)

	ω [°]	φ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
Hodnoty kalibrace LA (x, y, z) a BA (ω , φ , κ)	0.14772	-0.05483	0.25666	0.165	-0.022	0.048

Tabulka 5.41: Hodnoty BA a LA kalibrací – kalibrace LA a BA a SA (O2)

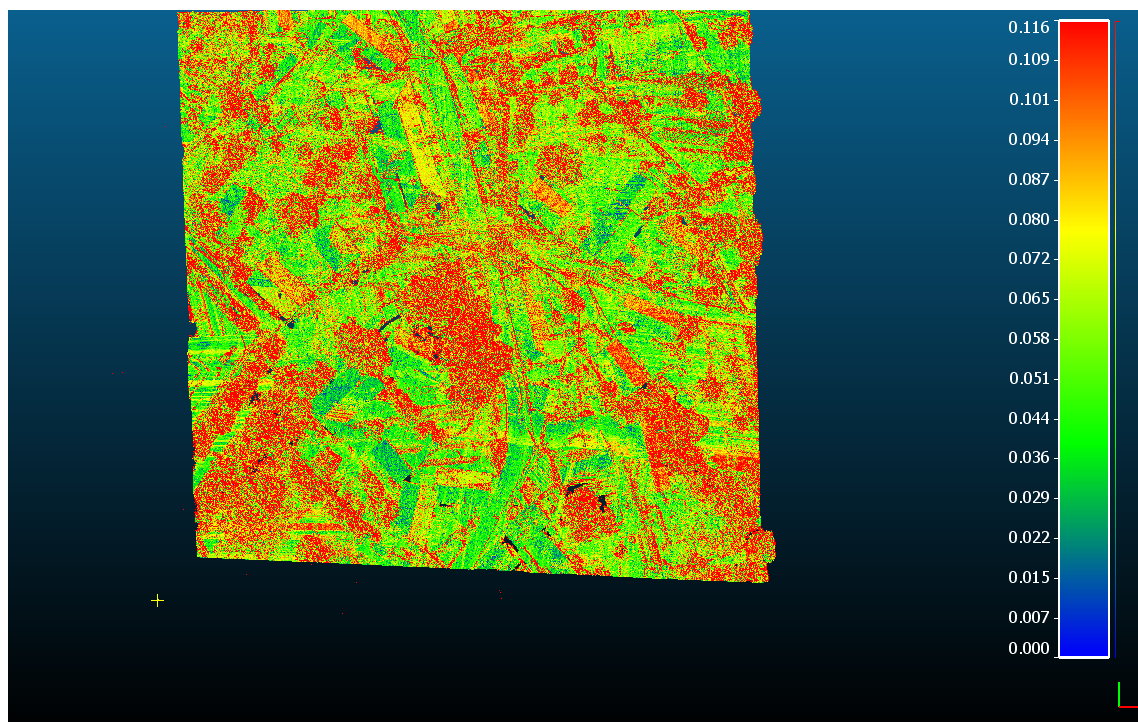
Název pásu	ω [°]	φ [°]	κ [°]	x [m]	y [m]	z [m]
_111338	0.017	-0.076	0.086	0.014	0.085	-0.005
_111414	0.015	0.612	0.021	-0.305	-0.132	-0.029
_111543	0.077	0.029	0.179	0.060	-0.162	-0.133
_111718	0.068	-0.318	0.086	-0.147	-0.138	-0.130
_111847	0.082	0.011	0.022	0.051	-0.009	0.044
_111926	0.002	-0.430	-0.573	0.232	-0.163	0.116
_112033	0.026	0.368	-0.241	0.022	0.098	0.075
_112120	0.045	0.044	0.087	0.072	-0.155	0.047

Tabulka 5.42: Hodnoty SA – kalibrace LA a BA a SA (O2)



Graf 5.21: Četnost vzdáleností hledaných ploch po kalibraci a SA – kalibrace LA a BA a SA (O2)

Výsledky (tab. 5.41, tab. 5.42 a graf 5.21) provedení všech metod jsou velmi podobné jako v předchozích případech. Zde bych upozornil, že u jakéhokoliv výpočtu se měnili jak úhly ω , φ i κ , tak i x, y, z, a to jak u kalibrací LA a BA, tak u metody SA. To znamená, že pokud porovnáváme jednotlivá bodová mračna, například pomocí reziduí v celém bodovém mračnu, tyto porovnané metody nikdy nemohou být stejné. Se stejným předpokladem jsme využili jinou metodu vyrovnání, tudíž výsledné bodové mračno nemůže být stejné jako bodové mračno vytvořené jiným způsobem. U zobrazení reziduí (obr. 5.21) lze spatřit, že hodnoty posunu výšky nekalibrovaného bodového mračna a mračna, které je upraveno pomocí kalibrace BA a LA a metody SA, dosahují hodnot 0.12 metru. A to především u vysoké vegetace. Menší odchylky jsou zaznamenány u cest a některých střech obytných domů.



Obrázek 5.21: Rezidua nezpracovaného bodového mračna a kalibrace LA a BA a SA (O2)

5.2.9 Rezidua na kontrolních bodech

Pro kontrolu pomocí reziduí byly vybrány body 18, 20, 22, 32 a 38. Tyto body byly rozmístěné po celém naskenovaném bodovém mračnu rovnoměrně.

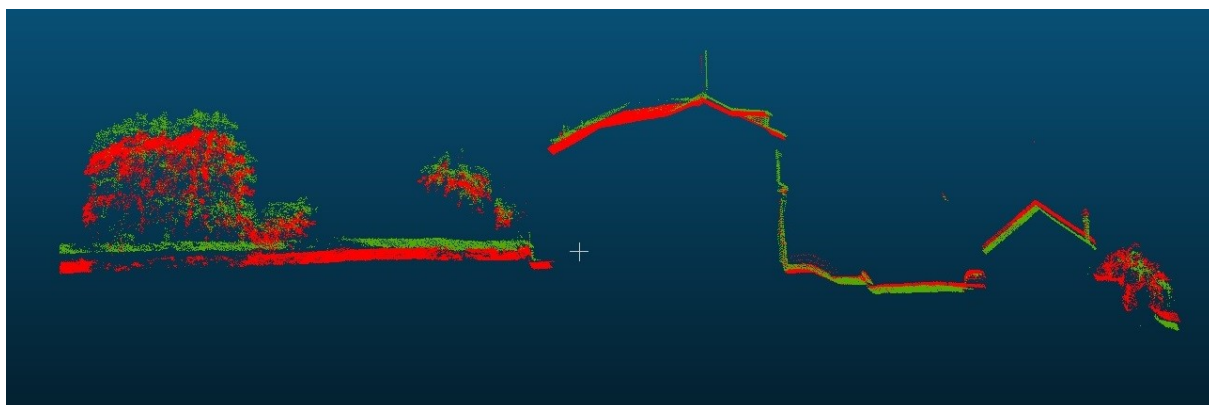
číslo bodu	18	20	22	32	38
Δ_{pi} nekalibrované bodové mračno [mm]	49	35	45	42	46
Δ_{pi} kalibrace LA a BA [mm]	11	15	20	13	13
Δ_{pi} kalibrace BA [mm]	10	17	19	12	9
Δ_{pi} kalibrace LA [mm]	9	14	14	12	9
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) [mm]	11	13	22	12	9
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) - posun [mm]	17	22	23	15	13
Δ_{pi} vyrovnaní pásů (SA) - rotace [mm]	18	18	13	17	12
Δ_{pi} kalibrace LA a BA a SA [mm]	10	15	18	12	10

Tabulka 5.43: Rezidua na kontrolních bodech v mm – software Infinity (O2)

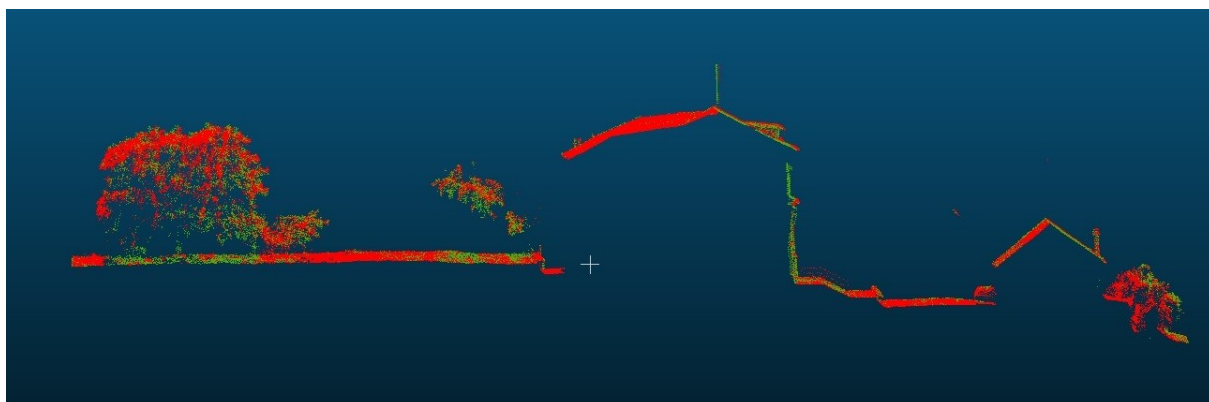
Stejně jako v případě oblasti Horní Vidimi lze pozorovat, že se vždy zlepšila přesnost po provedení jakékoliv metody (tab. 5.43). Horší výsledky slícování lze však vypočítat v případě vyrovnaní pásů samostatně u posunu a samostatně u rotace. V příloze jsou uvedeny tabulky s hodnotami reziduí v poloze (Y, X) a ve výšce pro všechny vypočítané kombinace.

Součástí validace výsledků je provedení příčných řezů vybraného objektu v naskenovaném bodovém mračnu. Stejný postup validace dat zvolil například Habib (2008). Na rozdíl od první experimentální oblasti, která byla skenována mimo obec, je oblast Dlouhá Ves ideální pro zobrazení rozdílů v příčném řezu pro nekalibrovaná a upravená data. Nejlepší zobrazení rozdílů slícování pásů je na obytných domech, respektive na objektech, které mají jasně definovaný tvar. V obci Dlouhá Ves byla vybrána místní základní a mateřská škola, jež je nejvyšší budovou v naskenovaném bodovém mračnu.

Pro potřeby validace výsledků byly vybrány dva pásy, které vybranou oblast nejvíce pokrývají. Byly vybrány pásy „190605_111926“ a „190605_111718“. Při provedení řezů byl nejmarkantnější rozdíl slícování těchto dvou pásů mezi nekalibrovaným bodovým mračnem (obr. 5.22) a mezi bodovým mračnem, jež bylo kalibrováno pomocí LA, BA a metody SA (obr. 5.23). Ostatní provedené řezy těchto dvou vybraných pásů se nacházejí v příloze této práce.



Obrázek 5.22: Řez dvou naskenovaných pásů (_111926 – zelená; _111718 - červená) nekalibrovaným bodovým mračnem



Obrázek 5.23: Řez dvou naskenovaných pásů (_111926 – zelená; _111718 – červená) po provedení kalibrace LA a BA a metody SA

6. Diskuze

Zatímco články s tematikou ALS laserového skenování (Wehl a kol. 1999; Persad a kol. 2015) nebo terestrického laserové skenování (Bitelli a kol. 2004; Lichti 2004; Pukanska a kol. 2014; Abellan a kol. 2015; Pirasteh a kol. 2016; Cai a kol. 2019; Ozdogan a kol. 2019) řeší spíše praktické využití těchto technologií, odborné články založené na UAV řešení (Clausen a kol. 2016; Li a kol. 2017; Akturk a kol. 2019; Hyypä a kol. 2020 nebo Chan a kol. 2021) se zaměřují spíše na přesnost této metody. Tímto se dostáváme k řešení kauzality, jež nám ozřejmí, že UAV laserové skenování je novou technologií. Paradoxně větší použitelnost a rozmach nastává v případě fotogrammetrie UAV (Pukanska a kol. 2014; Blistan a kol. 2016; Stocker a kol. 2017; Koska a kol. 2017; Grigillo a kol. 2018; Przybilla a kol. 2019), která se autorům zdá více uživatelsky přívětivá, a to především z důvodu automatizace procesů, nižší pořizovací ceny přístroje a též i menší velikosti UAV (kamera nemá tak vysokou hmotnost jako laserový skener). Velkou výhodou fotogrammetrie UAV je, že se přístroj může používat pouze jako kamera, například pro pasportizace nebo jako prohlížečka stavebních objektů.

Je vhodné zmínit, že použití těchto všech metod v praktických případech závisí hlavně na přesnosti dané metody. Nejčastějším případem je monitoring extravilánu, především pak etapové měření (v časových řadách). Etapové měření se nejvíce užívá právě při monitoringu stability objektů, například svahů (Bitelli a kol. 2004; Monserrat a kol. 2008; Braun 2014; Blistan a kol. 2016; Eker a kol. 2017; Mayr a kol. 2018 nebo Pan 2018). V tomto lze spatřovat, že právě pro monitoring geotechnických hazardů má laserové skenování UAV značný potenciál (Moon a kol. 2019).

Při procesu měření (v případě geodézie, metrologie apod.) a sběru dat je potřeba provést analýzu všech vstupních potenciálních proměnných, se kterými se následně bude pracovat. Podle Skalouda (2006), Glennieho (2007) i Cucciho (2017) je nezbytné pro dosažení co nejpresnějšího výsledku 3D modelu vytvořeného z UAV platformy provést řádný postup analyzování veškerých chyb tohoto přístroje. Bakule (2016), Yang (2018) nebo Trafina (2018) řeší danou problematiku především technicky. Zaměřují se na proces KF, který se snaží řešit technologicky. Problém spatřují v synchronizaci mezi IMU jednotkou, GNSS jednotkou, POS a laserovým skenerem. Tato problematika je tedy spíše technologického rázu a soustřeďuje se především na jednotlivé hardwarové součásti UAV skeneru, hlavně pak na programátorskou komunikaci mezi IMU/GNSS a POS.

Pomineme-li koncepční problematiku chyb UAV platformy, lze konstatovat, že v současnosti jsou chyby UAV laserového skenování děleny na jednotlivé komponenty. Chybu LiDARu, chybu IMU jednotky, chybu GNSS jednotky, chybu komunikace těchto snímačů a chybu jejich usazení. Starší literatura (Wehl a kol. 1999 nebo Vosselman a kol. 2001), která se zaměřuje na ALS laserové skenování, je pro poznatky UAV laserového skenování nenahraditelná. Teoretické základy jsou v tomto případě stejné a liší se spíše technickým pokrokem než menším nosičem LiDARu. Nehledě na to, chyby měření jsou zde stále stejné.

Jak je zmíněno v teoretické části práce, největší nepřesnost v naskenovaných datech způsobují zejména vektor středu snímačů LiDARu a IMU/GNSS jednotky a paralelní usazení jejich středů. Kalibrace, která zjišťuje právě velikost těchto chyb, je tak nenahraditelnou disciplínou k zajištění co největší přesnosti zpracovaného bodového mračka. Dnešní softwary jsou velmi sofistikované a vnitřní kalibraci (kalibraci *lever-arm offset* a *boresight angles*) počítají automatizovaně. Pomineme-li automatizované zpracování, je kalibrace LA a BA velmi dobře zdokumentována odbornými články (Clausen a kol. 2016; Cucci a kol. 2017 nebo Li a kol. 2019). Kalibrace LA nebo BA se počítá několika metodami, z nichž většina je založena na vyrovnaní MNČ (Rehak a kol. 2017 nebo Tu a kol. 2018). Přesto nehledě na kalibraci LA nebo BA je možné zvolit jiný přístup k přesnějšímu bodovému mračnu, respektive snahou všech těchto metod je jediná myšlenka – co největší geometrická přesnost.

Další metodou využívanou pro zlepšení přesnosti bodového mračka je vyrovnaní pásů (*strip adjustment*). Tato metoda nepotřebuje přímé georeferencování ani registrované mračno. Využívá předpokladu, že naskenované pásy obsahují stejné plochy nebo body a pokud jsou v rámci všech pásů slícovány, pásy se vyrovnají. Stejně jako metody kalibrace je SA výpočtově založena na MNČ. Přesto ani jeden z autorů, kteří se vyrovnaní pásů věnují (Habib a kol. 2008 nebo Li a kol. 2019), nezjišťovali vzájemný vliv kalibrací a SA na výsledné bodové mračno. Součástí této práce bylo též hodnocení vlivu trajektorie naskenovaných letů, přesněji pak hodnocení křížových letů.

V práci byly hodnoceny směrodatné odchylky použitých metod a byly zobrazeny histogramy četností slícovaných ploch. Stejný postup zvolil Li (2019), který však porovnával laserové skenování UAV a mobilního laserového skeneru připevněného na autě. Výsledky slícování dat u UAV hodnotil směrodatnou odchylkou, jež mu vycházela v případě skenování 0.05 metru, respektive 0.06 metru. V našem případě se směrodatná odchylka slícování dat

pohybovala okolo 0.01 metru, respektive okolo 0.02 metru u použití pouze rotace nebo posunu vyrovnání pásů. V závislosti na směrodatných odchylkách zmiňuje Chan (2021), že velmi závisí na naskenovaném území. Wang (2010) zmiňuje, že provedení křížových letů nemá vliv na výslednou přesnost slícování. U lokality Horní Vidim, kde byla tato metodika použita, nebylo zjištěno žádné zhoršení u směrodatné odchylky u použitých kombinací (příčných a podélných letů). Při kontrole geometrické korelace mezi nezpracovaným bodovým mračnem a upraveným mračnem se však prokázalo, že krajní část naskenovaného pásu, se výrazně posunula, či rotovala, na rozdíl od ostatních ploch bodového mračna. Toto reziduum ukázalo, že na krajní části naskenovaných pásů (které se nacházejí na okraji skenovaného území) je zde výraznější vliv provedených kalibrací nebo metody SA. Přesto se všechny zde vypočtené směrodatné odchylky použitých metod pohybovaly v intervalu od 0.02 metru do 0.01 metru. Nelze proto vyhodnotit, která z použitých metod je nejvhodnější. Habib (2011) zmiňuje, že není potřeba kalibrace LA a BA používat, jelikož vyrovnání pásů redukuje chybu způsobenou usazením snímačů IMU/GNSS a LiDARu. Následně ale Habib (2008 i 2011) dodává, že je však lepší kalibraci LA i BA provést. Zároveň ji pomocí SA i ve svých člancích počítá.

Co velmi ovlivňuje přesnost slícování je parametr (v případě slícování plocha na plochu) maximální vzdálenost normály nalezených ploch. Zde bylo v rámci experimentu u obou oblastí zvoleno několik možností nastavení parametru. Bylo zjištěno, že pokud se hodnota maximální vzdálenosti normály zvýšila nad hodnotu 0.1 metru, zvýšila se směrodatná odchylka slícování až na 0.03 metry. Rieger (2008) konstatuje, že prahová hodnota parametru maximální vzdálenosti normály pro hledání ploch je právě do 0.1 metru, a to pouze v případě větší letové hladiny. Nehledě na výpočet parametrů slícování ploch, které nám však určí přesnost výsledné použité metody, je dále důležitá geometrická přesnost vyrovnaných nebo kalibrovaných dat. Zde bylo použito kontrolních bodů, stejně jako v případě Cucciho (2017). U výpočtu reziduí na kontrolních bodech bylo zjištěno, že všechny použité kombinace metod zvyšují geometrickou přesnost bodového mračna.

Potvrdil se tak předpoklad z výpočtu směrodatných odchylek u jednotlivých kombinací vyrovnání pásů nebo kalibrací, že tyto metody jsou zcela na sobě nezávislé. Také nebyl zjištěn výrazný vliv posunu nebo rotace pásů u metody SA. Proto je možné využít jakoukoli z těchto metod. Přesto autoři jako Wang (2010) nebo Filin (2003) doporučují vždy provést LA a BA kalibraci. Zároveň upozorňují a dodávají, že je u každého letu vhodné provést nový přepočet hodnot BA a LA kalibrace. Zde vidíme analogii s naším výzkumem, totiž

že se jednotky LA kalibrace u obou experimentálních oblastí příliš neliší, ale hodnoty BA kalibrace jsou u dvou experimentálních lokalit odlišné.

7. Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce byla analýza vlivu provedení kalibrací IMU/GNSS UAV a LiDARu a metody vyrovnání pásů. Pro měření byl použit přístroj RIEGL miniVUX-1UAV. Pro výzkumný záměr byly vybrány dvě experimentální oblasti. První se nacházela v extravilánu obce Horní Vidim a druhá v intravilánu obce Dlouhá Ves.

Výzkum byl rozdělen do několika částí. V první části byl zaměřen na hledání parametrů slícování dvou naskenovaných sad měření. Byla využita metoda hledání plochy jednoho pásu a plochy druhého pásu. V tomto případě byla zjištěna závislost přesnosti slícování dat na parametru maximální délky normály dvou nalezených ploch. V dalších částech výzkumu byly využity nejideálnější parametry slícování dat pro výpočet závislosti jednotlivých metod zlepšení geometrické přesnosti bodového mračka. Jako první metoda byla využita kalibrace „*lever-arm offset*“ a „*boresight angles*“. Jako druhá metoda bylo zvoleno vyrovnání naskenovaných pásů „*strip adjustment*“. Při výzkumu bylo využito několika kombinací těchto metod. Součástí práce je i výpočet vlivu provedení naskenování křížových letů.

V rámci hodnocení vlivu metod kalibrací a vyrovnání pásů nebyla zjištěna žádná závislost. Přesnosti těchto metod byly srovnatelné, a to i při porovnání geometrické přesnosti celého bodového mračka. Jediným případem výraznější změny geometrie bodového mračka byl významný posun nebo rotace okraje naskenovaného pásu v případě skenování podélných pásů. Je však na místě podotknout, že při použití jakékoli kombinace použitých metod se značně zvýšila přesnost oproti stavu nekalibrovaného bodového mračka. Metoda použití křížových letů však neprokázala žádné výrazné zlepšení geometrické přesnosti.

Problematika laserového skenování UAV je velmi obsáhlá a nabízí nespočet možných druhů testů a výzkumů. Podle současné odborné literatury je však zatím spíše doplňkovou metodou k metodě fotogrammetrie z UAV. Laserové skenování UAV má velký potenciál v rámci zpracování měření z této metody pro možnosti vytvoření dalších metod a výpočtů sloužících k zpřesnění výsledného bodového mračka, potažmo pro vytvoření velmi kvalitního 3D modelu.

Použitá literatura a zdroje práce

- ABELLAN, A., LATO, M., EDWARDS, T., JABOYEDOFF, M. (2015): A 4D Filtering and Calibration Technique for Small-Scale Point Cloud Change Detection with a Terrestrial Laser Scanner. *Remote Sensing*. 2015. roč. 7, č. 10, s. 13029–13052. ISSN 20724292.
- AKCA, D., GRUEN, A. (2006): Fast correspondence search for 3D surface matching. In *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005: Enschede, the Netherlands, 12-14 September 2005*, s. 186–191.
- AKTURK, E., ALTUNEL, A. O. (2019): Accuracy assesment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2019. č. 136, s. 382–386. ISSN 02632241.
- BALTSAVIAS, E. P. (1999a): A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing*, roč. 54, č. 2–3, s. 83–94.
- BALTSAVIAS, E. P. (1999b): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, roč. 54, č. 2–3, s. 199–214.
- BAKULE, L., PAPIK, M., REHAK, B. (2016): Quantized event-triggered static output feedback stabilization. *2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), Control and Automation (ICCA)*. 2016. s. 499–504. ISBN 9781509017386.
- BANG, K., a kol. (2008): Integration of terrestrial and airborne LiDAR data for system calibration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. s. 391–398.
- BITELLI, G., DUBBINI, M., ZANUTTA, A. (2004): Terrestrial laser scanning and digital fotogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *University of Bologna*. 2004.
- BLISTAN, P., KOVANCIC, L., ZELIZNAKOVA, V., PALKOVA, J. (2016): Using UAV photogrammetry to document rock outcrops. *Acta Montanistica Slovaca*. 2016. roč. 21, č. 2, s. 154–161. ISSN 1335-1788.
- BRAUN, J. (2014): Geodetic monitoring methods of landslide-prone regions - application to Rabenov. *Acta Universitatis Carolinae. Geographica*, 2014.
- BRETAR, F., PIERROT-DESEILLIGNY, M., ROUX, M. (2004): Solving the strip adjustment problem of 3D airborne lidar data. *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. s. 4734–4737.
- CAI, Z., CHIN, T., BUSTOS, A. P., SCHINDLER, K. (2019): Practical optimal registration of terrestrial LiDAR scan pairs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. č. 147, s. 118–131. ISSN 09242716.
- CLAUSEN, P., REHAK, M., SKALOUD J. (2016): UAV Sensor Orientation with Pre-calibrated Redundant IMU/GNSS Observations: Preliminary Results. *DGPF. Bern, Schweiz: DGPF*, 2016. č. 25. ISSN 2512-2819.

- CUCCI, D. A., REHAK, M., SKALOUD, J. (2017): Bundle adjustment with raw inertial observations in UAV applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. č. 130, s. 1–12. ISSN 09242716.
- EKER, R., AYDIN, A., HUBL J. (2017): Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. *Environmental Monitoring And Assessment*. 2017. roč. 190, č. 1, s. 28. ISSN 15732959.
- ELSNER, P., DORNBUSCH, U., THOMAS, I., AMOS, D., BOVINGTON J., HORN, D. (2018): Coincident beach surveys using UAS, vehicle mounted and airborne laser scanner: Point cloud inter-comparison and effects of surface type heterogeneity on elevation accuracies. *Remote Sensing of Environment*. 2018. roč. 208, s. 15–26. ISSN 00344257.
- FILIN, S. (2003): Analysis and implementation of a laser strip adjustment model. *IAPRS*.
- GANDOR, F., REHAK, M., SKALOUD, J. (2015): Photogrammetric milion planner for RPAS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. roč. XL-1, č. W4, s. 61–65. ISSN 16821750.
- GLENNIE, C. (2007): Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*, roč. 1, č. 3, s. 147.
- GRESSIN, A., MALLET, C., DAVID, N. (2012): Improving 3D LiDAR point cloud registration using optimal neighborhood knowledge. *ISPRS*. 2012. roč. I-3, s. 111–116.
- GRIGILLO, D., AMBROZIC, T., PAVLOVCIC-PRESEREN, P., KOSMATIN-FRAS, M., URSIC, M., BONE, M. (2018): Analysis of the impact of interior orientation parameters in different uav-based image-block compositions on positional accuracy. *Metrology and Measurement Systems*. 2018. roč. 25, č. 3, s. 617–629. ISSN 23001941.
- GRUEN, A., AKCA, D. (2005): Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, roč. 59, č. 3, s. 151–174.
- HABIB, A. F., a kol. (2008): LiDAR strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips. *Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008. s. 385–390.
- HABIB, A. F., a kol. (2010): Alternative methodologies for LiDAR system calibration. *Remote Sensing*. 2010. roč. 2, č. 3, s. 874-907.
- HABIB, A. F., a kol. (2011): Geometric calibration and radiometric correction of LiDAR data and their impact on the quality of derived products. *Sensors*, 2011. roč. 11, č. 9, s. 9069-9097.
- HAMPACHER, M., RADOUCH, V. (1997): Teorie chyb a vyrovnávací počet 10. Skripta, Vydavatelství ČVUT, Praha, 159 stran.

- HYYPÄ, E., HYYPÄ, J., HAKALA, T., a kol. (2020): Under-canopy UAV laser scanning for accurate forest field measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. roč. 164, s. 41–60. ISSN 09242716.
- CHEN, Z., LI J., YANG, B. (2021): A Strip Adjustment Method of UAV-Borne LiDAR Point Cloud Based on DEM Features for Mountainous Area . *Sensors* 2021. roč. 21.
- JÁŠEK, P. (2018): *Zvyšování přesnosti dat 3D skenování pro geodetický monitoring*. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Stavební fakulta. 2018.
- JEŽEK, J. (2015): *Geostatistika a prostorová interpolace*. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. Nakladatelství Karolinum. 2015. ISBN 978-80-246-3076-2.
- JÚNIOR, A., N., a kol. (2019): Data mining based framework to assess solution quality for the rectangular 2D strip-packing problem. *Expert Systems with Applications*, 2019. roč. 118, s. 365–380.
- KOSKA, B., JIRKA, V., URBAN, R., KŘEMEN, T., HESSLEROVÁ, P., JON, J., POSPÍŠIL, J., FOGL, M. (2017): Suitability, characteristics, and comparison of an airship UAV with lidar for middle size area mapping, *International Journal of Remote Sensing*. 2017. roč. 38, č. 8–10, s. 2973–2990. ISSN 0143-1161.
- KORNUS, W., RUIZ, A. (2003): Strip adjustment of LIDAR data. *V Semana Geomática de Barcelona*, 2003. roč. 11, č. 03.
- KRSAK B., BLISTAN, P., PAULIKOVA, A., PUSKAROVA, P., KOVANIC, L. ml., PALKOVA, J., ZELIZNAKOVA, V. (2016): Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*. roč. 91, s. 276–287. ISSN 0263-2241.
- LI, J., a kol. (2017): Airborne position and orientation system for aerial remote sensing. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017.
- LI, Z., TAN, J., LIU, H. (2019): Rigorous boresight self-calibration of mobile and UAV LiDAR scanning systems by strip adjustment. *Remote Sensing*, 2019. roč. 11, č. 4, s. 442.
- LICHTI, D. (2004): A resolution measure for terrestrial laser scanners, Department of Spatial Sciences, Curtin University of Technology Perth, 2004.
- MAYR, A., RUTZINGER, M., GEITNER, C. (2018): Multitemporal analysis of objects in 3D point clouds for landslide monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018. roč. XLII-2, s. 691–697. ISSN 16821750.
- MONSERRAT, O., CROSETTO, M. (2008): Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. 2008, roč. 63, č. 1, s. 142–154. ISSN 09242716.
- MOON, D., CHUNG, S., KWON, S., SEO, J., SHIN, J. (2019): Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. *Automation in construction*. 2019. roč. 98, s. 322–331. ISSN 09265805.

MOUDRY, V., URBAN, R., STRONER, M., KOMAREK, J., BROUCEK, J., PROSEK, J. (2018): Comparison of a commercial and home-assembled fixed-wing UAV for terrain mapping of a post-mining site under leaf-off conditions. *International Journal of Remote Sensing*. 2018. s. 1–18.

NOVÁK, Z., PROCHÁZKA, J. (1998): Inženýrská geodézie 10. České vysoké učení v Praze. 1998.

OZDOGAN, M. V., DELIORMANLI, A. H. (2019): Landslide detection and characterization using terrestrial 3D laser scanning (LiDAR). *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2019. roč. 16, č. 4, s. 379–392. ISSN 12149705.

PAN, Y. (2018): Landslide Monitoring based on Terrestrial Laser Scanning. *A Novel Semi-automatic Workflow*. 2018.

PAVELKA, K. (2009): *Fotogrammetrie I*. České vysoké učení technické v Praze. 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.

PERSAD, R. A., ARMENAKIS, C. (2015): Alignment of point cloud DSMs from TLS and UAV platforms. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. roč. 40, č. 1, s. 369.

PIRASTEH, S., LI, J. (2016): Landslides investigations from geoinformatics perspective: quality, challenges, and recommendations. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2016. roč. 8, č. 2, s. 448–465. ISSN 1947-5705.

PRZYBILLA, H.-J., LINDSTAEDT, M., a KERSTEN, T. (2019): Investigations into the quality of image-based point clouds from UAV imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing*. 2019. roč. XLII-2, č. W13, s. 539–545. ISSN 16821750.

PUKANSKA, K., BARTOS, K., SABOVA, J. (2014): Comparison of Survey Results of the Surface Quarry Spišské Tomášovce by the Use of Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning. *Inžynieria Mineralna*. roč. 33, č. 1, s. 47–54. ISSN 1640-4920.

REHAK, M., MABILLARD, R., SKALOUD, J. (2013): A micro-UAV with the capability of direct georeferencing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013. roč. XL-1, č. W2, s. 317–323. ISSN 16821750.

REHAK, M., SKALOUD, J. (2015): Fixed-wing micro aerial vehicle for accurate corridor mapping. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. roč. II-1, č. W1, s. 23–31. ISSN 21949042.

REHAK, M., SKALOUD, J. (2017): Performance assessment of integrated sensor orientation with a low-cost GNSS receiver. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. roč. IV-2, č. W3, s. 75–80. ISSN 21949042.

RIEGER, P., STUDNICKA, N., PFENNIGBAUER, M., (2008): Boresight Alignment method for mobile laser scanning systems. *Proceedings from RSPS*, Moscow-Russia.

RIEGL (2020): Informace o přístroji RIEGL miniVUX-1UAV. Dostupné z: <http://www.riegl.com>.

- RUEGER, J. M.(1990): Electronic distance measurement: an introduction. 3rd totally rev. ed. New York: Springer-Verlag. ISBN 03-875-1523-2.
- SKALOUD, J., LICHTI, D. (2006): Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2006. roč. 61, č. 1, s. 47–59. ISSN 09242716.
- SKALOUD, J., LEGAT, K. (2008): Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2008. roč. 63, č. 2, s. 272–282. ISSN 09242716.
- SKALOUD, J., REHAK, M., LICHTI, D. (2014): Mapping with MAV: Experimental Study on the Contribution of Absolute and Relative Aerial Position Control. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014. roč. XL-3, č. W1, s. 123–129. ISSN 16821750.
- STOCKER, C., NEX, F., KOEVA, M., GERKE, M. (2017): Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of UAV-based mapping. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, č. 42, s. 355.
- ŠTRONER, M., POSPÍŠIL, J. (2008): Terestrické skenovací systémy. Praha: ČVUT v Praze. 185 stran. ISBN 978-80-01-04141-3.
- ŠTRONER, M., POSPÍŠIL, J., KOSKA, B., KŘEMEN, T., URBAN, R., SMÍTKA, V., TRÁSÁK, P. (2013): 3D skenovací systémy Praha: ČVUT v Praze. ISBN 978-80-01-05371-3.
- TRAFINA, T. (2018): *Application of Kalman's filter to improve the localization of multi-rotor UAVs*. Diploma thesis. Czech technical university in Prague. 2018.
- TU, Z., FEI, F., EAGON, M., ZHANG, X., XU, D., DENG, X. (2018): Redundancy-free UAV sensor fault isolation and recovery. *arXiv preprint*.
- URBAN, R., STRONER, M., KREMEN, T., BRAUN J., MOESER, M. (2018): A novel approach to estimate systematic and random error of terrain derived from UAVs: a case study from a post-mining site. *Acta montanistica slovacica*. 2018. roč. 23, č. 3, s. 325–336. ISSN 13351788.
- VOSSELMAN, G., MAAS, H. G. (2001): Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. *Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden*.
- WALSH, S. B., BORRELO, D. J., GULDUR, B., HAJJAR, J. F. (2013): Data Processing of Point Clouds for Object Detection for Structural Engineering Applications. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2013. roč. 28, s. 495–508.
- WANG L., SONG, W., LIU, Z., LI, H. (2010): Airborne LiDAR strip adjustment based on LSM. *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*, Yantai. 2010. s. 2727–2731.
- WEHR, A., LOHR, U. (1999): Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, roč. 54, č. 2–3, s. 68–82.

WOLF, P. R., GHILANI, CH. D. (1997): Adjustment Computations – Statistics and Least Squares in Surveying and GIS. John Wiley and Sohn, Inc., 564 stran.

YANG, Q., SUN, L. (2018): A fuzzy complementary Kalman filter based on visual and IMU data for UAV landing. *Optik*. 2018. roč. 173, s. 279–291. ISSN 00304026.

YANCHO, J. M. M., COOPS, N. C., TOMPALSKI, P., GOODBODY, T. R. H., PLOWRIGHT, A. (2019): Fine-Scale Spatial and Spectral Clustering of UAV-Acquired Digital Aerial Photogrammetric (DAP) Point Clouds for Individual Tree Crown Detection and Segmentation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing*. 2019. roč. 12, č. 10, s. 4131–4148. ISSN 19391404.

YILMAZ, V., KONAKOGLU, B., SERIFOGLU, C., GUNGOR, O., GOKALP, E. (2018): Image classification-based ground filtering of point clouds extracted from UAV-based aerial photos. *Geocarto international*. 2018. roč. 33, č. 3, s. 310–320. ISSN 10106049.

ZIEHER, T., BREMER, M., RUTZINGER, M., PFEIFFER, J., FRITZMANN, P., WICHMANN, V. (2019): Assessment of landslide-induced displacement and deformation of above-ground objects using UAV-borne and airborne laser scanning data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing*. 2019. roč. 4, č. 2, s. 461–467. ISSN 21949042.

Pro tuto práci byla použita citační norma ČSN ISO 690:2011: Bibliografické citace.

Přílohy práce

Kontrolní body – rezidua² - oblast Horní Vidim (O1) – kombinace 1

bod č. 5	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	22	25	25	42
Kalibrace LA a BA	12	13	12	21
Kalibrace BA	18	20	22	35
Kalibrace LA	18	20	18	32
Vyrovnání pásů (SA)	12	11	10	19
Vyrovnání pásů (SA) - posun	14	15	14	25
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	12	15	14	24
Kalibrace LA a BA a SA	11	14	9	20

bod č. 6	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	12	13	19	26
Kalibrace LA a BA	13	12	9	20
Kalibrace BA	15	15	15	26
Kalibrace LA	14	16	15	26
Vyrovnání pásů (SA)	12	15	13	23
Vyrovnání pásů (SA) - posun	9	9	15	20
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	13	14	16	25
Kalibrace LA a BA a SA	14	14	16	25

bod č. 11	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	41	43	55	81
Kalibrace LA a BA	15	38	49	64
Kalibrace BA	20	48	52	74
Kalibrace LA	32	41	48	71
Vyrovnání pásů (SA)	32	36	35	60
Vyrovnání pásů (SA) - posun	32	37	33	59
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	41	37	36	66
Kalibrace LA a BA a SA	39	39	26	61

² Všechny hodnoty v tabulkách jsou v absolutních hodnotách rozdílů měření a jedné z kombinací bodového mračna. Hodnoty reziduí bodového mračna a měření GNSS jsou počítány pomocí vzorce č. 2.21.

bod č. 12	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	21	22	46	55
Kalibrace LA a BA	22	19	16	33
Kalibrace BA	26	26	32	49
Kalibrace LA	26	26	31	48
Vyrovnání pásů (SA)	8	22	23	33
Vyrovnání pásů (SA) - posun	11	31	23	40
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	7	25	23	35
Kalibrace LA a BA a SA	6	25	24	35

bod č. 13	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	16	35	29	48
Kalibrace LA a BA	6	26	20	33
Kalibrace BA	26	34	28	51
Kalibrace LA	19	35	27	48
Vyrovnání pásů (SA)	7	25	18	32
Vyrovnání pásů (SA) - posun	12	23	20	33
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	14	21	19	32
Kalibrace LA a BA a SA	15	22	19	33

Kontrolní body – rezidua - oblast Horní Vidim (O1) – kombinace 2

bod č. 5	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	40	45	29	67
Kalibrace LA a BA	18	22	18	34
Kalibrace BA	30	35	32	56
Kalibrace LA	26	20	31	45
Vyrovnání pásů (SA)	15	22	14	30
Vyrovnání pásů (SA) - posun	22	17	15	32
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	12	12	18	25
Kalibrace LA a BA a SA	14	20	20	32

bod č. 6	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	46	42	40	74
Kalibrace LA a BA	8	22	16	28
Kalibrace BA	13	24	22	35
Kalibrace LA	12	15	23	30
Vyrovnání pásů (SA)	13	13	22	29
Vyrovnání pásů (SA) - posun	7	20	14	25
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	12	16	16	26
Kalibrace LA a BA a SA	15	16	20	30

bod č. 12	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	19	33	7	39
Kalibrace LA a BA	4	9	7	12
Kalibrace BA	5	23	9	25
Kalibrace LA	7	18	6	20
Vyrovnání pásů (SA)	7	12	6	15
Vyrovnání pásů (SA) - posun	6	12	10	17
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	6	15	8	18
Kalibrace LA a BA a SA	5	9	8	13

bod č. 13	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	15	31	20	40
Kalibrace LA a BA	9	20	8	23
Kalibrace BA	16	23	18	33
Kalibrace LA	26	20	11	33
Vyrovnání pásů (SA)	9	17	7	20
Vyrovnání pásů (SA) - posun	15	13	2	20
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	9	13	9	18
Kalibrace LA a BA a SA	14	12	5	19

Kontrolní body – rezidua - oblast Dlouhá Ves (O2)

bod č. 18	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	20	19	40	49
Kalibrace LA a BA	3	4	10	11
Kalibrace BA	1	2	10	10
Kalibrace LA	7	5	2	9
Vyrovnání pásů (SA)	5	8	8	11
Vyrovnání pásů (SA) - posun	3	15	7	17
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	11	10	10	18
Kalibrace LA a BA a SA	3	5	8	10

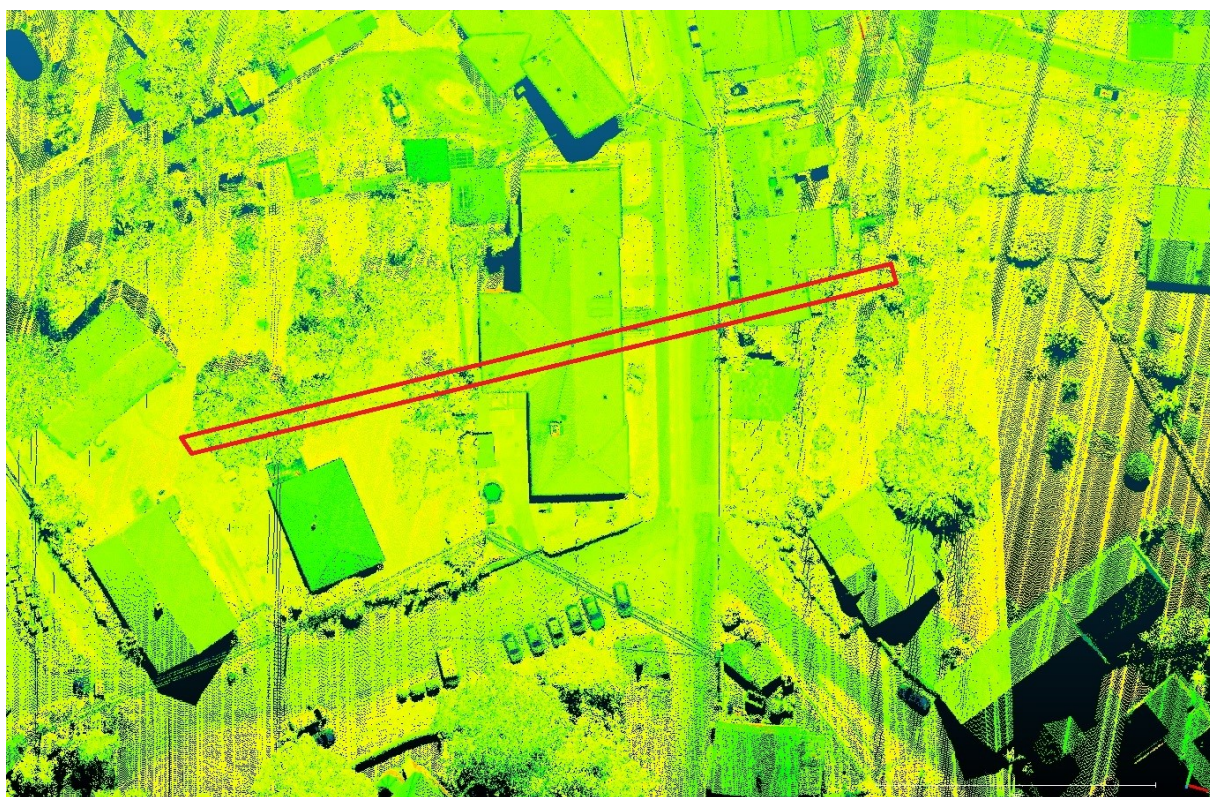
bod č. 20	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	16	6	30	35
Kalibrace LA a BA	10	4	10	15
Kalibrace BA	9	8	12	17
Kalibrace LA	7	10	7	14
Vyrovnání pásů (SA)	9	6	7	13
Vyrovnání pásů (SA) - posun	10	7	18	22
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	12	4	13	18
Kalibrace LA a BA a SA	8	4	12	15

bod č. 22	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	35	12	25	45
Kalibrace LA a BA	16	11	6	20
Kalibrace BA	14	9	9	19
Kalibrace LA	9	10	2	14
Vyrovnání pásů (SA)	14	14	9	22
Vyrovnání pásů (SA) - posun	12	15	13	23
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	4	10	7	13
Kalibrace LA a BA a SA	13	10	7	18

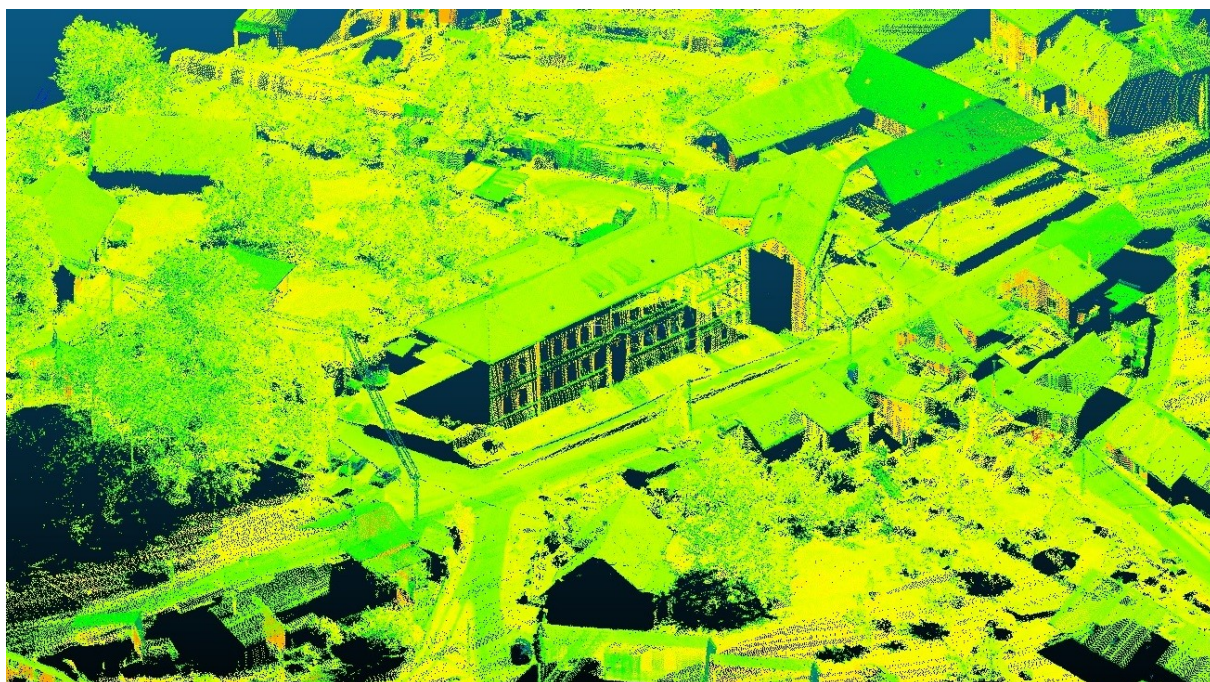
bod č. 32	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	20	30	22	42
Kalibrace LA a BA	0	10	8	13
Kalibrace BA	2	8	9	12
Kalibrace LA	5	5	10	12
Vyrovnání pásů (SA)	4	8	8	12
Vyrovnání pásů (SA) - posun	6	6	12	15
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	6	10	12	17
Kalibrace LA a BA a SA	4	6	9	12

bod č. 38	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Rezidua [mm]
Nekalibrované bodové mračno	8	34	30	46
Kalibrace LA a BA	4	4	12	13
Kalibrace BA	1	3	8	9
Kalibrace LA	3	7	4	9
Vyrovnání pásů (SA)	8	5	1	9
Vyrovnání pásů (SA) - posun	10	8	3	13
Vyrovnání pásů (SA) - rotace	4	11	1	12
Kalibrace LA a BA a SA	4	2	9	10

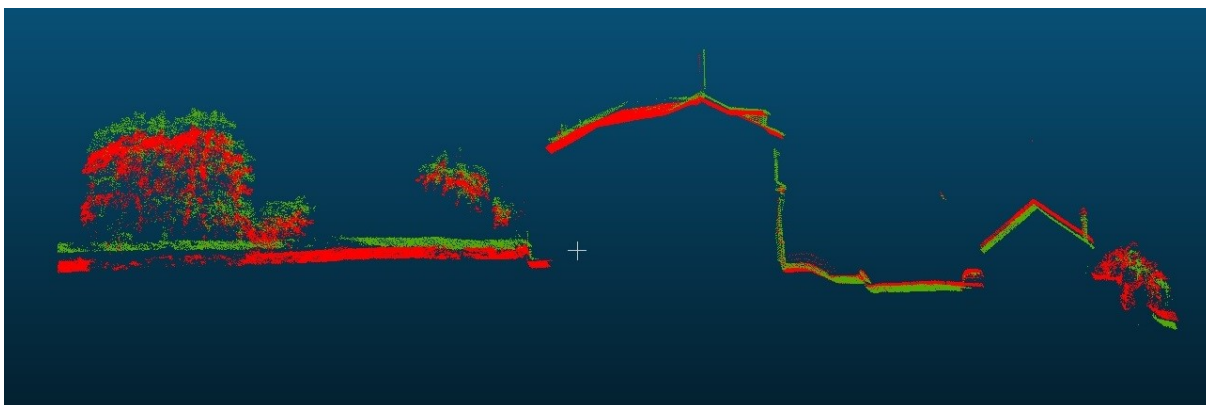
Příčné řezy – porovnání slícování pásů - oblast Dlouhá Ves (O2)



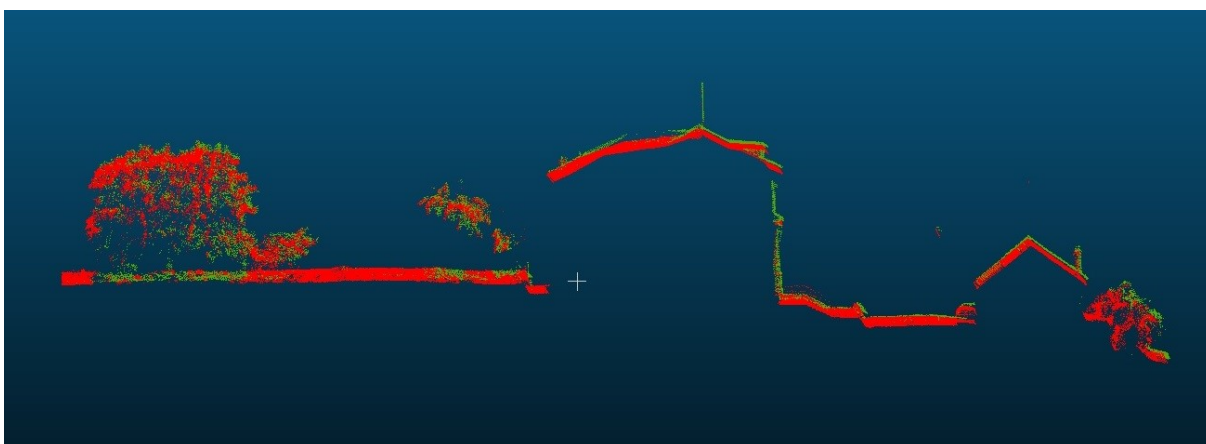
Provedení řezu v naskenované oblasti – objekt základní a mateřské školy v obci Dlouhá Ves



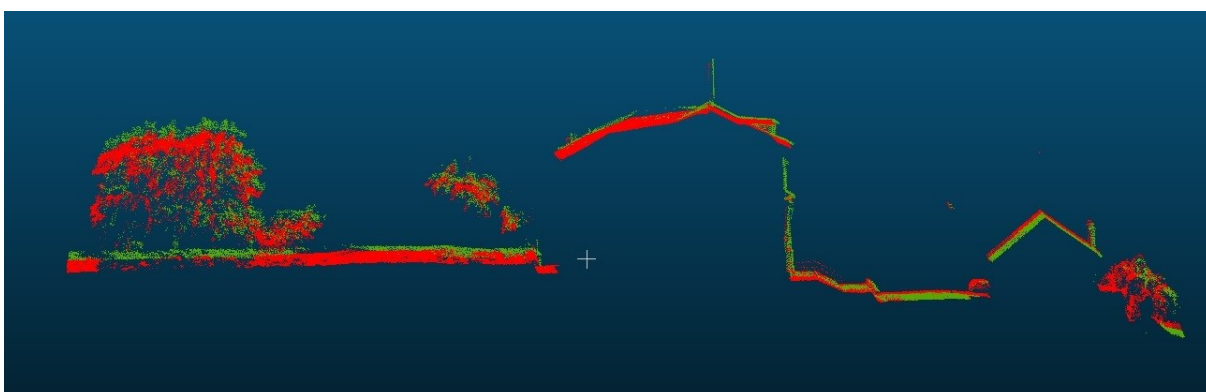
Boční pohled na naskenované bodové mračno



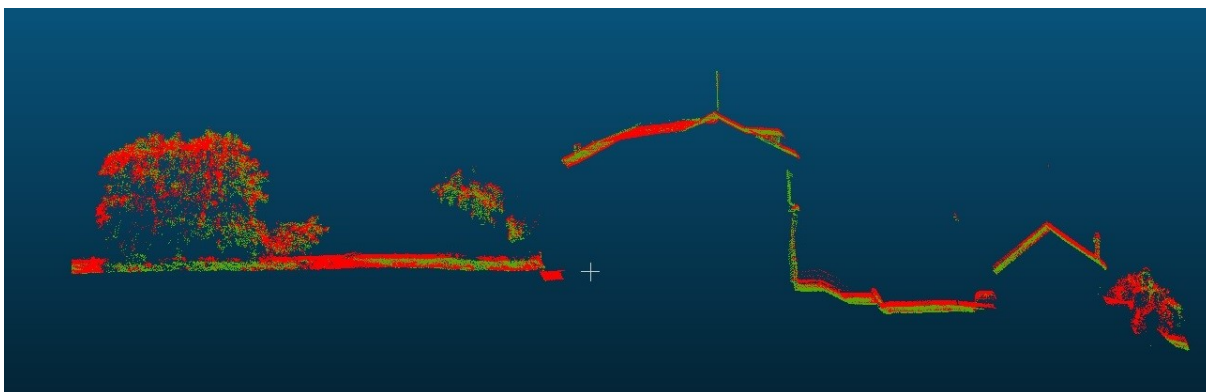
Řez dvou naskenovaných pásů nekalibrovaným bodovým mračnem



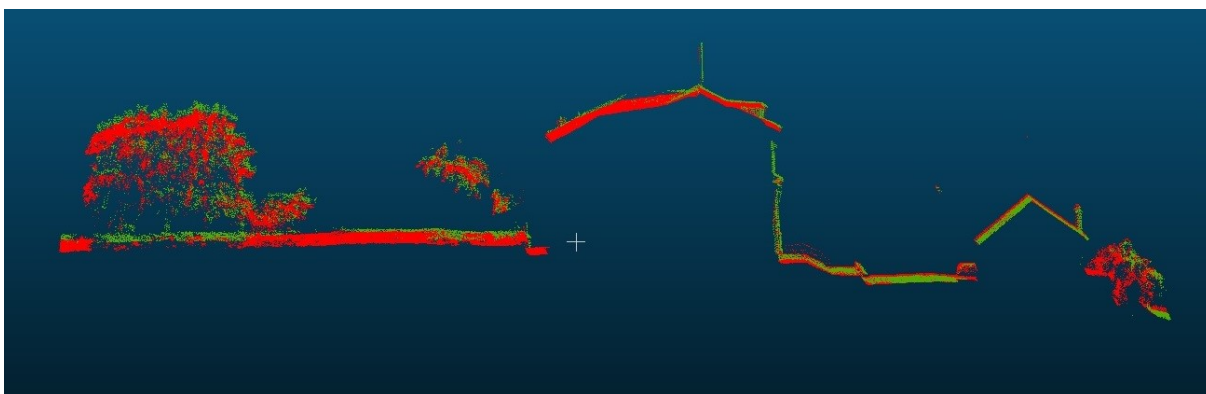
Řez dvou naskenovaných pásů po provedení kalibrace LA a BA



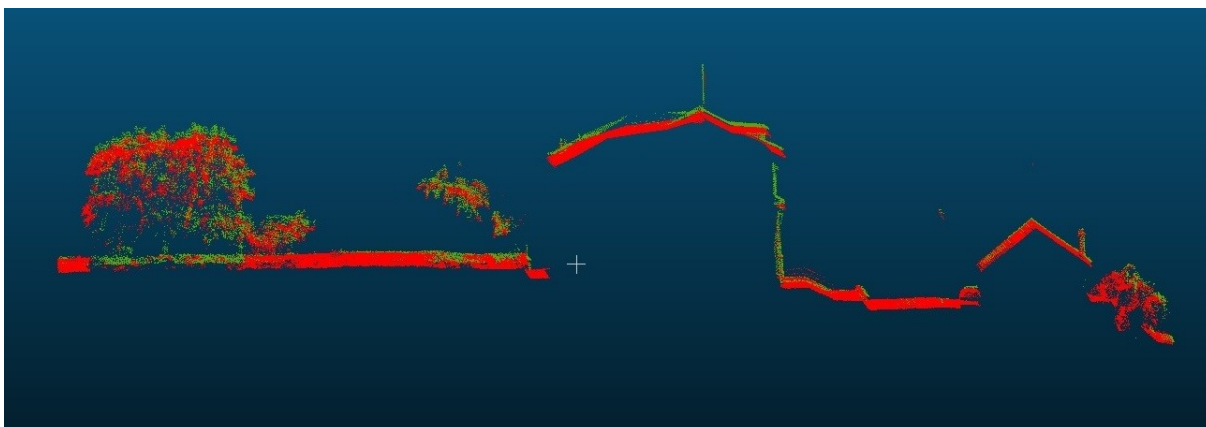
Řez dvou naskenovaných pásů po provedení kalibrace LA



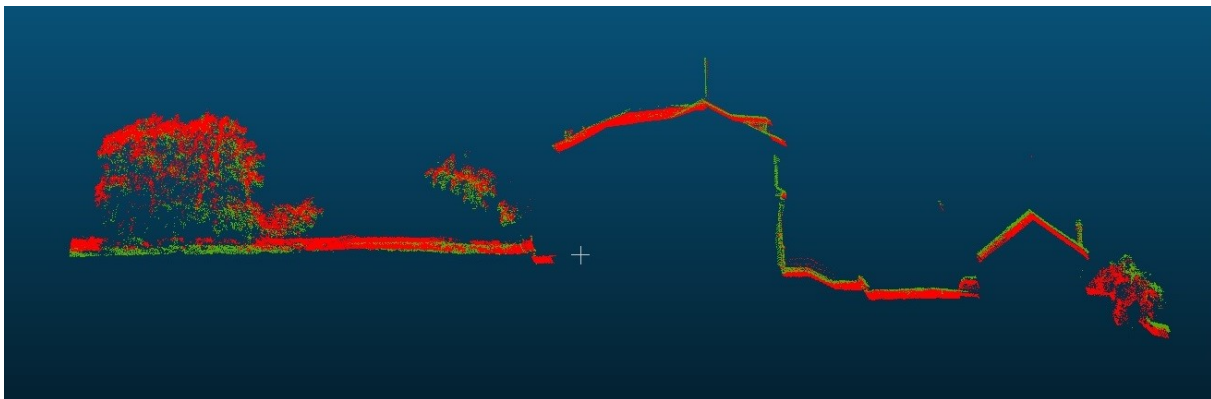
Řez dvou naskenovaných pásů po provedení kalibrace BA



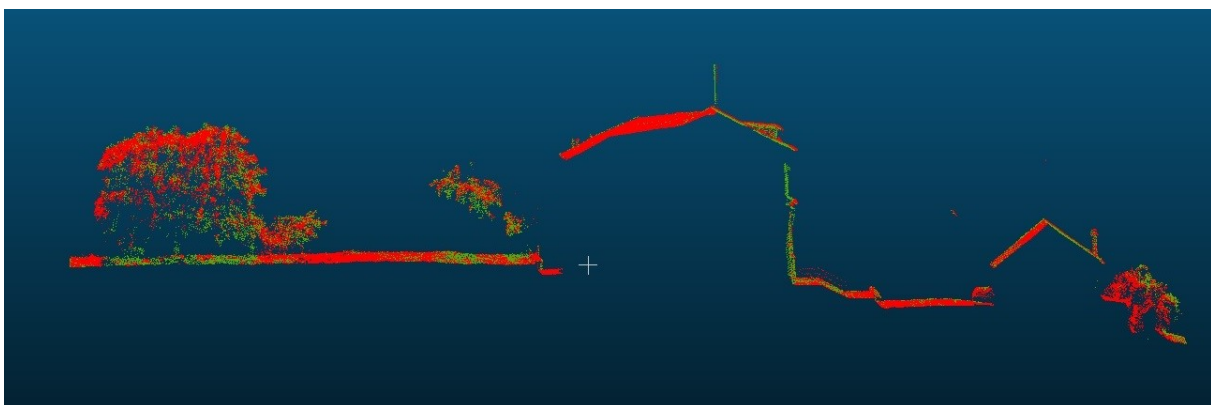
Řez dvou naskenovaných pásů po provedení SA



Řez dvou naskenovaných pásů po provedení SA – pouze posun



Řez dvou naskenovaných pásů po provedení SA – pouze rotace



Řez dvou naskenovaných pásů po provedení kalibrace LA a BA a metody SA

Použitý software

Při zpracování této diplomové práce byly použity tyto softwary:

- Agisoft Metashape
- AutoCAD Map 3D
- CloudCompare
- Cyclone 3DR
- ETJTZU
- Groma
- Infinity
- MATLAB
- POSPac
- RealityCapture
- Riegl RiPROCESS

Použité přístroje

Při zpracování této diplomové práce byly použity tyto přístroje:

- Trimble R10
- RIEGL miniVUX-1UAV